



Rendiconti  
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL  
*Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*  
132° (2015), Vol. XXXVIII, Parte II, pp. 7-37

ANIELLO RUSSO SPENA \*

## **Galileo Galilei: dall'*horror vacui* all'idea del continuo \*\***

**Summary** – The contribution of Galileo Galilei to scientific thought is described. Galilei was a great 17th century man, albeit with limitations that call for a revision of many of his answers. Nevertheless his way to ask, reason and quote, his strong desire for scientific autonomy, the effectiveness of his method and the use of his techniques are models to imitate for future scholars.

### L'EREDITÀ DI GALILEO GALILEI A 450 ANNI DALLA NASCITA

*Se ho visto più lontano è perché sono stato sulle spalle di giganti.* È molto probabile che scrivendo queste parole *Isaac Newton* non alludesse a *Galileo Galilei* (la frase, infatti, è una risposta sarcastica al suo odiato avversario scientifico *Robert Hooke* che, in molte occasioni, l'aveva accusato di plagio, e che, essendo di bassa statura e afflitto da deformità conseguente a una grave scoliosi, certamente non poteva sentirsi un gigante). È tuttavia fuori discussione che furono le leggi galileiane di caduta dei corpi nel vuoto a condurlo alla enunciazione del secondo principio della dinamica e alla realizzazione del suo straordinario modello della natura. *Newton* concepì l'idea che il moto della *Luna* attorno alla *Terra* (e quello di tutti i pianeti attorno al Sole) potesse essere analizzato come un processo di caduta governato dalle stesse leggi che regolano la caduta dei corpi sulla *Terra*.

*Galilei* cercò la prova dei movimenti della *Terra* interpretando (anche se in

\* Socio dell'Accademia. Ordinario di Idraulica presso l'Università degli Studi dell'Aquila.  
E-mail: [aniello.russospena@univaq.it](mailto:aniello.russospena@univaq.it)

\*\* Prolusione per l'inaugurazione del 132° Anno Accademico. Roma, 15 Maggio 2014, Biblioteca dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Scuderie Vecchie di Villa Torlonia.

modo assai infelice!) il fenomeno delle maree con il *principio di relatività* che lui stesso aveva dedotto sulla base di esperienze di laboratorio.

Entrambi quindi immaginarono che la manifestazione di un processo che avviene negli spazi siderali potesse essere analizzato con le stesse leggi che valgono sulla *Terra* e, in questo modo, diedero dimostrazione di una genialità grandiosa. La stessa genialità appare in *Archimede da Siracusa* (che *Galilei* considerava *divino*<sup>1</sup>) allorché, per dimostrare agli increduli contemporanei la possibilità di pronunciare numeri grandi quanto si volesse, calcolò quanti granelli di sabbia sarebbero stati necessari per riempire l'intera sfera celeste.

Oltre che dalla genialità, *Newton* e *Galilei* furono uniti da una coincidenza storica: il primo nacque nello stesso anno in cui il secondo chiudeva la sua esistenza terrena. Nondimeno il destino di questi due grandi uomini fu molto diverso.

*Newton*, fino alla fine dei suoi giorni, fu circondato dall'ammirazione degli scienziati suoi contemporanei e dei potenti della *Terra*.

*Galilei*, dopo un drammatico processo che, con piena soddisfazione dei suoi *dotti* contemporanei, lo costrinse ad abiurare le scoperte che lo avrebbero reso immortale, trascorse gli anni della vecchiaia nella sua casa di *Arcetri*, ristretto agli arresti domiciliari. Nonostante la limitazione di libertà, forse anche perché circondato dall'affetto dei suoi allievi (*Bonaventura Cavalieri*, *Vincenzio Viviani*, *Evangelista Torricelli*, per citare i più noti), gli ultimi anni di *Galilei* furono dal punto di vista scientifico molto fruttuosi. È infatti nella *sua carcere di Arcetri* (così, in quegli anni, chiamava la sua casa) che *Galilei* completò il suo capolavoro scientifico: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*<sup>2</sup>.

Ai *Discorsi*, che hanno in embrione tutti i contenuti della scienza dei moderni, nella edizione del 1638 che curò personalmente, *Galilei* diede una struttura composta: nella prima parte (le prime due giornate), tre interlocutori (*Salviati*, in rappresentanza di *Galilei*; *Sagredo* e *Simplicio* in rappresentanza, il primo, dei profani aperti alla nuova scienza e l'altro della scienza ligia all'autorità dei classici), discutono il problema della *resistenza dei materiali* dialogando nella lingua italiana del '600; nella seconda parte (le ultime due giornate) *Salviati* simula la lettura di un trattato latino sul problema del moto dei corpi, interrompendosi ogni volta che *Simplicio* e *Sagredo* chiedono qualche chiarimento.

Nei dialoghi *Salviati* delimita con chiarezza l'orizzonte scientifico entro cui agisce il *nostro Accademico*: egli non cerca il *perché* dei fenomeni, ma il *come* questi fenomeni devono essere analizzati.

Accade così per la resistenza dei materiali: l'esperienza gli aveva dimostrato che una trave caricata trasversalmente al suo asse offre una resistenza alla rottura molto minore di quella che offrirebbe se fosse sollecitata da una forza diretta secondo l'asse;

<sup>1</sup> Galilei G., *Opere* (a cura di Favaro A.), Edizione Nazionale, vol. I.

<sup>2</sup> Galilei G., *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, (a cura di A. Carugo e L. Geymonat) Boringhieri, Torino, 1958.

ancora l'esperienza rivelava le sensibili differenze di comportamento esibito da travi di eguale forma e dimensioni ma costituite di materiali diversi.

Per interpretare i risultati sperimentali *Galilei* assimilò la trave agli astratti solidi della geometria euclidea e applicò a questi oggetti le leggi di equilibrio già dimostrate da *Archimede*: si trattò di una schematizzazione troppo drastica e scarna per rispecchiare la complessità di un fenomeno che, con incertezze tutt'ora perduranti, è stato chiarito solo dalla moderna *meccanica della rottura*.

Tuttavia la lacunosa soluzione galileiana ebbe dei meriti innegabili. Nei *Discorsi*, infatti, *Galilei* ricondusse le ragioni della coerenza dei corpi all'*horror vacui* e, *non bastando questo*, a qualche *glutine, visco o colla, che tenacemente colleghi le particole delle quali esso corpo è composto*.

Nella soluzione del problema, il ricorso al *vacuo* non rappresentò soltanto un residuo della fisica aristotelica dal momento che il *nostro Accademico* ne aveva misurato la *forza* in occasione della realizzazione della sua *pompa* per il sollevamento dell'acqua; l'idea poi che la materia fosse costituita di elementi molto piccoli fatti delle quattro sostanze fondamentali (*aria, acqua, terra e fuoco*) e mescolati in proporzioni diverse era già contenuta ne *Il Saggiatore*<sup>3</sup>, opera pubblicata 15 anni prima dei *Discorsi*.

*Galilei* era consapevole che sulle singole particelle appartenenti alla generica sezione trasversale di una trave dovesse agire una *forza interna*. Sin dalla prima giornata dei *Discorsi* aveva infatti osservato che

Quel filo che stretto tra le dita non segue chi, con qualche forza tirandolo, vorrebbe di tra esse sottrarlo, resiste perché da doppia compressione viene ritenuto; avvenga che non meno il dito superiore preme contro quello inferiore, che questo si preme contro a quello.

Ma le forze interne possono essere espresse in termini di forze per unità di superficie e se si considera un elemento di superficie molto piccolo, queste diventano le *tensioni o sforzi* che possono immaginarsi distribuite *con continuità* in tutti i punti della considerata sezione trasversale della trave.

Di questa distribuzione *Galilei* non seppe definire le corrette proprietà. Occorre attendere il XIX secolo perché il problema, per merito di *Cauchy*, trovi la soluzione adeguata dando in questo modo avvio a quel fondamentale capitolo della meccanica (la *meccanica dei mezzi continui*) così denso di conseguenze per tutta la scienza moderna.

*Galilei* è un uomo del '600, con i suoi limiti e le sue grandezze e, pertanto, molte delle sue risposte devono essere cambiate. Ma il suo modo di domandare, ragionare e citare, la sua istanza di autonomia, la forza del suo metodo e l'applicazione delle sue tecniche, costituiranno per tutte le generazioni di studiosi un modello da imitare.

<sup>3</sup> Galilei G., *Il Saggiatore* (a cura di L. Sosio) Milano, Feltrinelli 1995

1. L'8 gennaio del 1642, nella casa di *Arcetri* dove era stato confinato dall'Autorità ecclesiastica, *Galileo Galilei* concludeva la sua esistenza terrena. La morte lo colse mentre, nonostante i malanni della vecchiaia (era nato a *Pisa* nel 1564) e la totale cecità, era ancora impegnato nella rielaborazione dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, il capolavoro scientifico pubblicato sei anni prima a *Leida*.

I suoi contemporanei compresero subito che l'evento non riguardava

[...] solamente Firenze, ma il mondo universo e tutto il nostro secolo che da questo divin uomo ha ricevuto più splendore che quasi da tutto il resto dei filosofi ordinarii.

Fu *Lukas Holste*, uno stretto collaboratore del Cardinale *Francesco Barberini*, uno dei giudici che nel 1633 si rifiutarono di sottoscrivere la condanna inflitta dal *Sant'Uffizio* a *Galilei*, ad informare con queste parole un suo amico fiorentino e a profetizzare<sup>4</sup> che

[...] cessata l'invidia, si comincerà a conoscere la sublimità di quell'ingegno, che a tutta la posterità servirà per scorta nel ricercare il vero, tanto astruso e seppellito tra il buio delle opinioni.

In effetti, fin da giovane, *Galilei* si era fatto notare dai dotti fiorentini per la sua attiva partecipazione alla vita culturale della città e per i suoi acuti interventi anche su questioni molto lontane da quelle che l'avrebbero impegnato negli anni della sua maturità scientifica: sono di questo periodo, infatti, le sue conferenze (*letture pubbliche*) circa la figura, sito e grandezza dell'*Inferno* di *Dante* e quelli relativi all'arte di *Ludovico Ariosto* (che stimava *grande poeta, argutissimo, a niun altro inferiore*), e di *Torquato Tasso* (che considerava esponente di una poesia fondata su vuoti giochi di parole).

La sua attività fu molto apprezzata dall'influente marchese *Guidobaldo del Monte*, (valente matematico e autore, nel 1577, del *Mechanicorum liber*) che, nel 1587, ne propose la chiamata alla *Cattedra di Matematica* dell'Università di *Bologna*.

*Bologna*, tuttavia, gli preferì *Giovan Antonio Magini*, un astronomo tanto famoso e apprezzato anche all'estero (con le sue *Ephemerides coelestium motuum* del 1582 aveva fornito tavole planetarie più affidabili di quelle fino ad allora disponibili per la previsione dei fenomeni celesti) da essere invitato, nel 1610, a collaborare, a *Praga*, con *Johannes Kepler* il matematico che, nel *Mysterium cosmographicum* del 1596, con la sua affermazione

[...] con tutta la mia scienza astrologica, non possiedo numero sufficiente di certezze da osar predire in tutta fiducia fatti precisi

avrebbe segnato l'inizio di una nuova sensibilità della *scienza* nei confronti dell'*esperienza*.

<sup>4</sup> Galilei G., *Opere* (a cura di A. Favaro), Edizione nazionale, vol. XVIII.

All'insegnamento universitario *Galilei* giunse due anni dopo (nel 1589), allorché l'Università di *Pisa* gli affidò la cattedra di *Matematica*. A *Pisa* non si trattene a lungo: il rigido ambiente tradizionalista ma, soprattutto, un accordo di lavoro che prevedeva, tra l'altro, la sottrazione del compenso per le lezioni non tenute, e che, in ogni caso, risultava inadeguato a fronteggiare le accresciute necessità familiari (dopo la morte del padre *Vincenzio*, oltre alla cura della madre *Giulia Ammanati*, del fratello *Michelangelo* e delle sorelle nubili *Lena* e *Livia*, *Galilei* dovette farsi carico delle richieste del marito della sorella maggiore *Virginia* che pretendeva il rispetto degli accordi prematrimoniali sottoscritti con il suocero), lo indussero a cercare alternative più convenienti.

Il 26 settembre del 1592, grazie all'appoggio dei fratelli *del Monte* (al marchese *Guidobaldo* si associò il Cardinale *Francesco Maria*), l'Università di *Padova* assegnò a *Galilei* la Cattedra di *Matematica*, vacante per la scomparsa del titolare *Giuseppe Moletti*.

Il 13 dicembre dello stesso anno, sei giorni dopo la *prolusione* tenuta davanti ad un pubblico vasto ed entusiasta, *Galilei* diede inizio al suo ciclo di lezioni accademiche (due lezioni settimanali nelle ore pomeridiane) a cui aggiunse cicli di lezioni private indirizzate a quegli uditori (italiani e stranieri) destinati ad occupare ruoli di rilievo nella società dell'epoca e, pertanto, particolarmente interessati ad approfondire i temi classici della sua scienza.

A *Padova*, dove resterà fino al 1610, circondato dalla crescente ammirazione dei suoi allievi e dalla stima di amici e protettori, *Galilei* mise a frutto le conoscenze acquisite nei suoi anni giovanili e nel periodo in cui era stato lettore nello *Studio* pisano: ispirato dagli insegnamenti privati del matematico *Ostilio Ricci*, aveva infatti già scoperto la *legge dell'isocronismo delle piccole oscillazioni del pendolo* (1583), inventato la *Bilancetta* idrostatica per la determinazione del peso specifico dei corpi (1586), sviluppato quelle ricerche sulla *caduta dei gravi* di cui diede successivamente conto nei manoscritti oggi noti con il titolo *De Motu*<sup>5</sup>.

Al periodo padovano appartengono l'invenzione di un *compasso progressivo* (che descrisse, nel 1606, in *Le operazioni del compasso geometrico e militare*), e di una *pompa* per il sollevamento dell'acqua che, grazie al brevetto concessogli dal *Senato Veneto*, gli assicurò una modesta rendita ventennale. Ancora a *Padova*, avuta notizia della costruzione, in *Olanda*, di un cannocchiale, realizzò l'*occhiale* (fu il principe *Federico Cesi*, suo contemporaneo e fondatore, nel 1603, dell'*Accademia dei Lincei*, a coniare il nome di *telescopio*), la più celebre delle sue invenzioni.

Nel laboratorio impiantato nella sua abitazione con la collaborazione del fido artigiano *Marcantonio Mazzoleni*, ripercorrendo le ricerche di *Leonardo da Vinci* (che, peraltro, non lo influenzarono in alcun modo in quanto resi noti, e neppure integralmente, dal fisico modenese *Giovan Battista Venturi* solo nel 1797), *Galilei* studiò

<sup>5</sup> Galilei G., *Opere* (a cura di A. Favaro), Edizione nazionale, vol. I.

la caduta dei corpi lungo un *piano* la cui inclinazione rispetto all'orizzontale poteva essere variata a piacimento. Con lo stesso dispositivo, come si evince dal suo scritto *Le Meccaniche*<sup>6</sup>, databile tra il 1593 e il 1599, e pubblicato per la prima volta in francese (a *Parigi*), nel 1634 e, successivamente in italiano (a *Ravenna*), nel 1649, *Galilei* aveva già analizzato il problema dell'*equilibrio dei corpi*.

La sua formidabile capacità di estrarre dalla realtà empirica i fattori che determinano i processi che di volta in volta analizzava e di stabilirne la connessione, lo portarono, tra il 1602 e il 1609, ad affermare che, nel vuoto, tutti i corpi, indipendentemente dalla loro costituzione, cadono con la stessa accelerazione (di gravità)  $g$ , a riconoscere l'analogia tra il moto di caduta dei gravi e il moto periodico del pendolo semplice (e, di conseguenza, a stabilire con procedimenti deduttivi elementari, la relazione approssimata tra il suo periodo  $T$  e la radice quadrata della sua lunghezza  $l$ ), a esporre la *legge di inerzia*, a scoprire la *forma parabolica della traiettoria* dei proiettili.

2. Nel 1609, dunque, *Galilei* aveva affrontato e risolto pressoché tutte le questioni fisico-matematiche che esporrà in forma più matura nel *Dialogo di Galileo Galilei sopra i due massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano* del 1632<sup>7</sup> e, soprattutto, nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* del 1638: fu egli stesso, nel febbraio del 1609, ad annunciarlo ad *Antonio de' Medici* in una lettera contenente anche la rappresentazione grafica della traiettoria parabolica *de i proietti* e a confermarlo nel 1632 allorché, completata la sua teoria del moto, in una lettera inviata all'accademico linceo *Cesare Marsili*, confessò la *fatica* che gli era costata, negli anni trascorsi a *Padova*, l'analisi del moto *violento*.

Ma il 1609 segnò anche l'anno del mutamento dei suoi interessi scientifici: le osservazioni eseguite con l'*occhiale*, l'invenzione che aveva presentato al *Senato Veneto* il 25 agosto di questo stesso anno, lo indussero infatti a interrompere le indagini teoriche e sperimentali sul moto e a divulgare, con il *Sidereus nuncius*<sup>8</sup> pubblicato in latino il 12 marzo del 1610, le *cose grandi* (sia per l'*importanza dell'argomento stesso*, sia per la *novità*, sia per lo *strumento utilizzato*) che gli si erano manifestate.

Le *cose grandi* a cui *Galilei* si riferiva erano effettivamente *novità inaudite*: la *Via Lattea*, che gli antichi rappresentavano come una nebulosa così densa da riflettere la luce del *Sole* e delle stelle, non era altro che un sistema costituito da un numero

<sup>6</sup> Galilei G., *Opere* (a cura di Favaro A.), Edizione nazionale, vol. II.

<sup>7</sup> Galilei G., *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano* (a cura di L. Sosio) Einaudi, Torino, 1970.

<sup>8</sup> Galilei G., *Sidereus Nuncius* (a cura di F. Flora) Ricciardi, Milano-Napoli, 1953. Per una descrizione dettagliata delle scoperte compiute da Galilei con il telescopio, si vedano anche: Shea W.R., *La rivoluzione intellettuale di Galilei: 1610-1632*, Sansoni, Firenze, 1972; Drake S., *Galileo. Una biografia scientifica*, Il Mulino, Bologna, 1988.

incredibile di corpi celesti non visibili ad occhio nudo; la superficie della *Luna*, ricca di monti e avvallamenti, non possedeva le perfezioni postulate da *Aristotele*; intorno a *Giove* ruotavano quattro pianeti (in un primo tempo, assimilati a *piccole ma luminosissime* stelle fisse) che, in onore del *Granduca di Toscana Cosimo II*, *Galilei* battezzò *Pianeti Medicei*.

La vastissima risonanza del *Sidereus nuncius* nel mondo scientifico, riaprì all'autore le porte dell'Università di *Pisa*, che lo nominò matematico *sopra-ordinario* (*Onorario*) senza obbligo di insegnamento e di residenza nella città e, come lo stesso *Galilei* ebbe modo di scrivere, lo introdusse tra gli *illustrissimi signori Cardinali, Prelati, e diversi Principi*.

In realtà la conversione galileiana agli studi di astronomia si era manifestata ben prima del 1610: già nel novembre del 1604, infatti, aveva tenuto un gruppo di lezioni su una *Stella Nuova* nella costellazione del *Sagittario*, scoperta a *Verona* pochi giorni prima (il 9 ottobre) dall'astronomo *Ilario Altobelli*.

In accordo con *Kepler*, *Galilei* fu dell'opinione che la *Nuova* dovesse essere collocata oltre il cielo della *Luna* sebbene la variazione di luminosità a cui essa andò soggetta nei primi giorni del periodo in cui si mantenne visibile (dall'ottobre del 1604 al marzo del 1606), apparisse un chiaro indizio del suo movimento rispetto alle *stelle fisse*. Per gli aristotelici suoi contemporanei, che consideravano lo spazio celeste oltre la *Luna* popolato da corpi celesti immuni da variazioni di qualunque natura e quindi anche da variazioni di posizione, *Galilei* divenne portatore di un'eresia scientifica.

Alle aspre polemiche che sortirono dall'acceso dibattito il nostro scienziato non volle sottrarsi, ma anzi, in collaborazione con il monaco benedettino *Girolamo Spinelli*, compose (nel 1605), in dialetto padovano, un opuscolo dal titolo *Dialogo de Cecco di Ronchitti da Bruzene in perpuosito de la Stella Nuova*, il cui tono satirico e sferzante contribuì ad alimentare quell'ostilità dei tradizionalisti che, negli anni successivi, tanto avrebbe nuociuto a lui e alla sua *Nuova Scienza*.

La risonanza internazionale del *Sidereus Nuncius*, anche grazie al contenuto della lettera che *Kepler* inviò a *Galilei* nell'aprile del 1610 e che, il mese successivo, rese pubblica con l'opuscolo *Dissertatio cum nuncio sidereo*, inasprì le dispute scientifiche. Pur riconoscendo la novità e l'importanza della scoperta galileiana dei pianeti medicei, infatti, *Kepler* si rallegrò per quegli studiosi (come *Plutarco*, *Maestlin* e lui stesso) che, riguardo alla *Luna*, alla *via Lattea* e alle *Nebulose*, anche senza l'uso del cannocchiale, *da tempo avevano affermato la stessa cosa*, e attribuì a *Giovan Battista della Porta*, l'autore del *Magiae naturalis libri XX* del 1589, l'idea della costruzione del cannocchiale.

In realtà *della Porta* (che pure nel XVIII libro del *Magiae naturalis* si era occupato delle lenti e del loro possibile uso per correggere i difetti della vista), non realizzò mai il cannocchiale considerandolo, come scrisse a *Federico Cesi* nell'agosto del 1609, *una coglionaria [...] presa dal mio libro 9 De refractione*.

La lettera di *Kepler* diede agli avversari di *Galilei* l'opportunità di attaccarlo per la sua pretesa di aver inventato il cannocchiale ma, soprattutto, come sostenne

il laico fiorentino *Francesco Sizzi* nel suo libello *Dianoia astronomica et physica* del 1611, per il suo tentativo di *mettere alla prova le menti dei più indotti* servendosi di dispositivi (le lenti) che generano illusioni ed errori. Turbato dalla polemica tra la concezione copernicana e tolemaica del mondo che animava l'ambiente scientifico e filosofico del suo tempo, riferendosi a *Galilei*, *Sizzi* scriveva infatti<sup>9</sup>:

Non credo ch'egli abbia mai sostenuto che quell'antica scuola di astronomi errasse nel porre i principi; in effetti, come la casa poggia sulle fondamenta, così le scienze si fondano sui principi, e se questi franano e rovinano, è inevitabile che, al pari della casa, la scienza crolli.

Anche gli accademici fecero sentire il loro parere: in coerenza con i filosofi tradizionalisti, *Cesare Cremonini*, uno dei più famosi professori dell'Università di *Padova*, aggiunse all'argomento aristotelico della distinzione tra realtà materiale e realtà celeste (la prima fatta di *terra, aria, acqua e fuoco*, la seconda fatta di una sostanza immutabile, diversa dalle prime quattro e per questo detta *quintessenza*), l'osservazione, vagamente profetica, che le regole adottate per la misura delle distanze sulla *Terra* non potevano essere estese alle più grandi distanze planetarie.

Alle critiche degli oppositori *Galilei* rispose, indirettamente, con l'entusiastica partecipazione degli allievi alle sue coinvolgenti lezioni universitarie e con gli straordinari risultati delle sue ricerche astronomiche.

Nel luglio del 1610, rilevò quell'anomalia di *Saturno* (il pianeta e i suoi anelli gli apparvero come un grande globo affiancato da due globi più piccoli, ciascuno immobile rispetto agli altri) che, successivamente, così descrisse a *Giuliano de' Medici*

[...] con mia grandissima ammirazione ho osservato essere non una stella sola, ma tre insieme, le quali quasi si toccano; sono tra loro totalmente immobili [...]. Se si riguarderanno con un occhiale che non sia di grandissima moltiplicazione, non appariranno 3 stelle ben distinte, ma parrà che Saturno sia una stella lunghetta in forma di una uliva [...].

Poco tempo dopo (intorno alla fine di settembre), con la scoperta delle *fasi* di *Venere* ebbe la prova della rotazione di questo pianeta intorno al *Sole*. Al grande scienziato non sfuggì che questo risultato, insieme all'osservazione dei quattro *planeti medicei*, costituiva un validissimo argomento a favore della *teoria eliocentrica* di *Copernico* di cui, come aveva confidato a *Kepler* molti anni prima (1597), egli stesso era sempre stato un convinto sostenitore, anche se, per paura del ridicolo, si era sempre astenuto dal contraddire pubblicamente l'opinione opposta, sostenuta *da gente infinita, poiché grandissimo è il numero degli stupidi*.

Affinché la notizia della scoperta potesse rapidamente raggiungere *Kepler*, *Galilei* inviò a *Giuliano de' Medici* (che soggiornava a *Praga*) un logogrifo (*Haec immatura a me iam frustra leguntur o, y*) che in seguito provvide a svelare: *Cintyae figuras aemulatur mater amorum* con il quale annunciava che *Venere* (*mater amorum*), con le sue fasi, imita la *Luna* (*Cintya*).

<sup>9</sup> Sizzi F., *Dianoia astronomica, optica, physica*, in *Le opere di Galileo Galilei*, vol. III.



Con la pubblicazione (a cura dell'*Accademia dei Lincei*) dell'opuscolo *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti* (1613), *Galilei* rese pubblici i risultati delle ricerche relative al *Sole* che aveva avviato nell'estate del 1610. In polemica con il gesuita *Cristoph Scheiner* (che sotto lo pseudonimo di *Apelle*, in tre lettere del 1612 inviate all'influente banchiere dei gesuiti *Marco Welser*, si attribuiva il merito della scoperta delle macchie solari), *Galilei* espose che queste potessero essere assimilate a fenomeni apparenti dovuti a frammenti di roccia o piccoli pianeti orbitanti intorno al *Sole*: se così fosse stato, infatti, questi pianeti avrebbero dovuto muoversi su orbite più interne e con velocità maggiori di quella di *Mercurio* e, di conseguenza, sarebbero risultati visibili sul disco solare con cadenza regolare e per un tempo minore di quello in cui lo stesso *Mercurio* si rende visibile quando si interpone tra il *Sole* e la *Terra*. Per *Galilei*, l'irregolarità della loro forma e la casualità del loro apparire e svanire, portava ad assimilare le macchie solari a materia fluida, trasportata *dalla conversione del Sole in se stesso, che in un mese lunare in circa finisce il suo periodo*.

Con la sua risposta al gesuita in incognito (della cui vera identità, peraltro, era stato informato da un pittore romano, suo amico), oltre a rendere pubblica l'importante scoperta della rotazione del *Sole* intorno al proprio asse, ufficializzò per la prima volta il suo conflitto con un membro dell'ordine ecclesiastico: il tono sostanzialmente scortese con cui liquidò le ipotesi sulla natura delle macchie solari (a *Federico Cesi* che gli aveva raccomandato di esporre le sue osservazioni in modo rispettoso, *Galilei* confidò di non essere riuscito a contraddire le inconsistenti argomentazioni dell'ecclesiastico con un tono diverso da quello usato nel suo opuscolo), gli rese ostili anche quei Gesuiti del *Collegio Romano* che, come egli stesso orgogliosamente riconobbe *hanno voluto vedere le mie osservazioni e sono tutti restati appagati* e che avevano affermato la sostanziale veridicità delle sue scoperte.

Preoccupato per la piega che gli eventi andavano prendendo, nel dicembre del 1613 *Galilei* indirizzò a don *Benedetto Castelli* (il monaco *cassinese* suo devoto allievo, che insegnò nell'Università di *Pisa* e, successivamente, alla *Sapienza* di *Roma*), una lettera aperta (destinata, quindi, alla pubblicazione) nella quale, pur ricercando la conciliazione tra la *Scienza* e la *Fede*, affermò la legittima indipendenza della ricerca scientifica dalla teologia.

Le opinioni di *Galilei* giunsero, sotto forma di lettera manoscritta, alla *Congregazione dell'Indice*, l'organo per il controllo della stampa fondato dal Papa *Pio V*.

La *Congregazione* osservò che la lettera non costituiva un documento a stampa e, di conseguenza, senza neppure esaminarla, la trasmise agli uffici dell'*Inquisizione* per i pareri di competenza.

Fu un amico di *Galilei*, il sacerdote fiorentino *Giovanni Ciampoli*, a comunicargli che, nella lettera, i teologi dell'*Inquisizione* non avevano rilevato affermazioni eretiche e a riferirgli il suggerimento dell'influente Cardinale *Maffeo Barberini* (il futuro Papa *Urbano VIII*), di esporre le proprie teorie scientifiche come ipotesi matematiche utili per salvare i fenomeni.

3. Il suggerimento del futuro Papa era coerente con il contenuto della prefazione al *De revolutionibus orbium coelestium* di *Nikolaj Kopernik* (1473-1543), più noto con il nome italianizzato di *Niccolò Copernico*, l'astronomo di *Torun* (*Polonia*) che, avendo privato la *Terra* della sua posizione di centro immobile dell'*Universo*, aveva anche reso meno importante il genere umano e l'*Io* individuale.

*Copernico* aveva iniziato i suoi studi nel 1491 in *Polonia*, nell'Università di *Cracovia* dove era ancora vivo l'insegnamento di *Regiomontano* (1436-1476), probabilmente il matematico più influente del XV secolo, autore di un'apprezzata versione latina dell'*Almagesto*, l'opera in cui *Claudio Tolomeo*, il grande astronomo alexandrino attivo nel II secolo d.C., aveva esposto la sua teoria planetaria (il sistema tolemaico), e aveva realizzato la *tavola delle corde* degli archi, strumento indispensabile per gli astronomi suoi successori per oltre 1000 anni.

Dopo ulteriori studi, in *Italia*, di *diritto*, *medicina* e *astronomia* e un breve periodo di insegnamento a *Roma*, nel 1510 *Copernico* tornò in patria dove fu nominato canonico a *Frauenburg* e dove, nonostante fosse impegnato in doveri legati non solo alla sua figura ecclesiastica (si occupò anche dell'attuazione di una complessa riforma monetaria), riuscì a completare il *De revolutionibus orbium coelestium*, opera che lo rese famoso.

La versione completa del trattato, stampata nel 1543 (lo stesso anno in cui l'autore morì), non diventò un successo editoriale (il prezzo di vendita troppo elevato lo pose rapidamente fuori commercio e la ristampa del 1617 ad *Amsterdam*, successiva a quella di *Berna* del 1566, fu oscurata dall'*Astronomia Nova* con cui, nel 1609, *Kepler* enunciava le leggi del moto dei pianeti). In compenso, segnò il tramonto della scienza greca e l'inizio della *scienza dei moderni*.

*Copernico* non fu consapevole di questo straordinario risultato: a condurlo al suo sistema del mondo, infatti, erano state quelle teorie degli antichi che ammettevano un qualche movimento della *Terra*. E questo riferimento *Copernico* lo aveva trovato in *Cicerone*, che attribuiva a *iceta*, un filosofo seguace delle teorie pitagoriche, vissuto a *Siracusa* tra la fine del V e l'inizio del IV secolo a.C., l'idea che la *Terra* si muovesse, e in *Plutarco* che attribuiva la stessa opinione a *Filolao*, filosofo pitagorico, contemporaneo di *Socrate* e di *Democrito* che, nato a *Taranto*, o forse a *Crotone*, visse a *Eraclea*, in *Lucania*, e a *Tebe*, in *Beozia*.

Furono questi i presupposti che lo spinsero

a meditare intorno alla possibilità di un movimento della *Terra*. E sebbene l'opinione potesse sembrare assurda, confidando nel fatto che, ad altri, era stata concessa la libertà di immaginare qualsivoglia cerchio per spiegare i fenomeni celesti, ritenni che anche a me, senza difficoltà fosse concesso di cercare se, ammesso un qualche movimento della *Terra*, si potessero trovare spiegazioni più sicure delle loro sulla rivoluzione delle sfere celesti.

Nei fatti, tuttavia, la concessione della libertà che, come matematico, *Copernico* rivendicò a se stesso ebbe conseguenze devastanti sulla fisica antica: l'affermazione del moto della *Terra*, infatti, portava ad assimilare questa a tutti gli altri astri e a negare la differenza, postulata da *Aristotele*, tra i mondi celeste e terrestre.

Sul piano epistemologico le conseguenze dell'impostazione copernicana furono ancora più profonde: benché fosse molto lontano dal possedere i concetti su cui, circa un secolo dopo, *Isaac Newton* avrebbe fondato il suo *modello* della natura, egli elaborò una *meccanica* basata sul presupposto che il moto dei corpi fosse determinato dalla loro forma geometrica e non dalla qualità della sostanza che li costituisce.

Con questa impostazione *Copernico* non si limitò ad attribuire alle proprietà geometriche dei corpi un vero e proprio significato fisico ma, postulando che la spiegazione stessa dei fenomeni celesti fosse insita nella *Geometria*, rese assolutamente insignificante la distinzione, sostenuta da *Aristotele*, tra la *matematica* (che si occupa solo di *numeri* e *figure*) e la *filosofia* (che si occupa di *sostanze*).

Il *De revolutionibus orbium coelestium*, prudentemente dedicato al papa *Paolo III*, fu stampato con una prefazione del teologo *Andreas Osiander* che, impressionato dalla violenza con cui *Martin Lutero*, il riformatore della Chiesa cattolica, contrastava le teorie copernicane, all'insaputa dell'autore, cercò di attenuarne la portata rivoluzionaria attribuendo al sistema (approssimativamente) *eliocentrico* (*Copernico* sosteneva che la posizione del *Sole* fosse prossima al centro intorno a cui circolano i corpi celesti) il significato di un artificio per meglio calcolare le tavole trigonometriche.

La prefazione di *Osiander* capovolgeva il pensiero di *Copernico* e, per questo, *Kepler* la bollò come lo scritto di un somaro per altri somari, e *Giordano Bruno*, il filosofo che, all'universo finito e diviso tra sfere *crystalline* e mondo *sublunare* di *Aristotele*, opponeva la visione di un universo infinito e unitario e che, per il coraggioso rifiuto di ritrattare le sue dottrine, fu condannato come eretico dal *Sant'Uffizio* e arso vivo, nel 1600, in *Campo dei fiori* a *Roma*, la criticò severamente.

La teoria copernicana fu sostenuta, in un saggio pubblicato a *Napoli*, anche da *Paolo Antonio Foscarini*, un frate *carmelitano* nativo di *Montalto di Calabria*, il cui cognome originario, *Scarini*, si era trasformato in quello con cui è oggi conosciuto probabilmente per deformazione del nome *Fra Scarini* che discendeva dall'accostamento del suo titolo ecclesiastico al nome di famiglia<sup>10</sup>.

*Foscarini*, che come prova della validità del sistema eliocentrico aveva utilizzato proprio le scoperte astronomiche di *Galilei*, inviò una copia del saggio a *Roberto Bellarmino*, il gesuita che, in qualità di consulente del *Sant'Uffizio*, si era occupato della vicenda di *Giordano Bruno* (senza riuscire, peraltro a evitarne la condanna) e che, nominato Cardinale nel 1605 dal Papa *Pio V* e posto a capo dello stesso *Sant'Uffizio*, era impegnato, in quegli anni, a gestire il processo alle idee copernicane.

In risposta al frate, il 12 aprile del 1615, *Bellarmino* sostenne che è *benissimo detto, e non ha pericolo nessuno* affermare che, con l'ipotesi eliocentrica

si salvano tutte le apparenze meglio che con porre gli eccentrici et epicicli [...]; e questo basta al mathematico: ma volere affermare che realmente il Sole stia nel centro del mondo, e solo si rivolti in se stesso, senza correre dall'oriente all'occidente, e che la Terra stia nel terzo cielo e giri con somma velocità intorno al Sole,

<sup>10</sup> Righini A., *Galileo tra scienza, fede e politica*, Editrice Compositori 2008.

è cosa molto pericolosa non solo d'irritare tutti i filosofi e theologhi scolastici, ma anche di nuocere alla santa fede, con rendere false le Scritture Sante.

Sul piano epistemologico la posizione di *Bellarmino* era legittima giacché l'ipotesi copernicana discendeva da motivazioni formali (e quindi convenzionali e non di natura sperimentale) che escludevano la necessità di una nuova interpretazione delle *Scritture*.

Opposta a quella di *Bellarmino* era la posizione di *Galilei*: convinto che la prova diretta del moto terrestre risiedesse nel *fenomeno delle maree* (egli riteneva infatti che, così come l'acqua che riempie il fondo di una barca in moto alternativamente accelerato e decelerato lungo la sua rotta si raccoglie ora nella zona di prua, ora nella zona di poppa, anche il flusso e il riflusso delle maree avrebbe potuto manifestarsi solo in conseguenza del moto, non uniforme, della *Terra*), anche confidando nella benevolenza del futuro *Urbano VIII*, nelle sue conferenze pubbliche, continuò a professarsi copernicano e a ridicolizzare i suoi detrattori. Ne danno una chiara testimonianza le due lettere<sup>11</sup> che Monsignor *Querengo* inviò al Cardinale *Alessandro d'Este*, il 30 dicembre 1615:

Abbiam qua il Galileo, che spesso in ragunanze d'uomini d'intelletto curioso fa discorsi stupendi intorno all'opinione di Copernico, da lui creduta per vera

e il 20 gennaio del 1616:

Del Galileo avrebbe gran gusto V.S. Illustrissima se l'udisse discorrere come spesso fa in mezzo di xv e xx che gli danno assalti crudeli, quando in una casa, quando in un'altra. Ma egli si sta fortificato in maniera che si ride di tutti; e sebbene non persuade la novità della sua opinione, convince nondimeno di vanità la maggior parte degli argomenti co' quali gli oppugnatori cercano di atterrarlo. Lunedì in particolare, in casa del Sig. Federigo Ghisleri fece nuove pruove meravigliose; quello che mi piacque in estremo fu, che prima di rispondere alle ragioni contrarie, le amplificava e rinforzava con nuovi fondamenti d'apparenza grandissima, per far poi, nel rovinarle, rimanere più ridicoli gli avversari.

In realtà le certezze di *Galilei* non poggiavano su una base sicura giacché la sua teoria delle maree discendeva da una non felice applicazione del *principio del moto relativo*, oggi noto come *Principio di relatività galileiana*: egli, infatti, attribuiva la non uniformità del moto della *Terra* alla combinazione della *rotazione giornaliera antioraria* intorno a se stessa con il *moto progressivo annuale* (anch'esso *antiorario*) intorno al *Sole*. Con questa schematizzazione, nel corso di uno stesso giorno, le due parti della *Terra* disposte simmetricamente rispetto alla direzione del moto progressivo non potevano che assumere velocità rispettivamente uguali alla somma e alla differenza delle due velocità di rotazione e di traslazione. Incurante del fatto che la sua impostazione al problema delle maree conduceva ad una conclusione contraddetta dall'evidenza sperimentale (in una data località il flusso e il riflusso dell'acqua

<sup>11</sup> Feyerabend P.K., *Il realismo scientifico e l'autorità della scienza*. Il Saggiatore, Milano 1983.

si sarebbe verificato una sola volta al giorno e non due), fidando nell'atteggiamento indulgente del futuro papa *Urbano VIII* e nell'amicizia del *Granduca di Toscana, Galilei* non comprese la gravità dello scontro in atto tra la Chiesa e la Scienza (nella seduta del 25 febbraio del 1616 la *Congregazione dell'Indice* aveva dichiarata falsa filosoficamente ed erronea in *fide*, l'opinione secondo cui la *Terra* non è ferma al centro del mondo, aveva proibito il saggio di *Foscarini*, aveva posto all'indice il *De revolutionibus* di *Copernico*), né volle ascoltare l'ammonizione del *Cardinale Bellarmino*, che pure gli manifestava benevolenza, di parlare *ex suppositione*, e si avviò alla rovina.

Questa, tuttavia, non arrivò subito: la protezione di amici potenti di cui ancora godeva, evitò che, per lui, l'*Inquisizione* adottasse i suoi metodi più brutali e gli consentì di dedicarsi ad alcuni progetti di interesse militare che, con l'approvazione del granduca di *Toscana*, avrebbe voluto vendere alla corte spagnola<sup>12</sup>.

A riattivare la sua vena polemica fu la notizia che il gesuita *Orazio Grassi*, in un opuscolo del 1618, aveva sostenuto la teoria che le comete fossero corpi celesti orbitanti intorno alla *Terra* al di sopra del cielo della *Luna* (quest'ultima deduzione discese dalla constatazione che, al pari delle *stelle fisse*, le comete non presentano la parallasse, ossia la loro posizione non appare modificata rispetto alle stelle fisse quando si modifica la posizione del punto da cui sono osservate). Secondo l'opinione di molti, la teoria di *Grassi* demoliva l'ipotesi eliocentrica e ciò indusse *Galilei* ad affidare all'amico *Piero Guiducci*, console dell'*Accademia Fiorentina*, l'incarico di esporre, in una seduta accademica, il suo scritto dal titolo *Discorso delle comete*.

Nel *Discorso*, che peraltro non sottoscrisse, *Galilei* diede alle comete la denominazione di *planeti dipinti* e le interpretò come il risultato di effetti ottici dovuti alla riflessione della luce su colonne di vapore che, dalla *Terra*, si innalzavano nello spazio sublunare. A suo parere, questa teoria giustificava anche l'assenza di parallasse indicata da *Grassi*.

*Grassi*, che era un matematico di vaglia, si avvide della inconsistenza del punto di vista galileiano e nel suo *Libra Astronomica ac Philosophica* (pubblicato sotto lo pseudonimo di *Lotario Tarsi*) con poco garbo, mise in evidenza le numerose contraddizioni in cui *Galilei* era incorso e, soprattutto, l'adesione dello scienziato pisano alla teoria copernicana posta all'indice dall'*Inquisizione*.

*Galilei* rispose a *Grassi* con *Il Saggiatore*, il suo capolavoro letterario del 1623, dove, dopo aver ribadito la sua critica verso quanti ritenevano che *la filosofia fosse un libro e una fantasia d'un uomo, come l'Iliade e l'Orlando Furioso* nel quale non ha alcuna importanza la veridicità di ciò che è stampato, affidava alle dimostrazioni della matematica il compito di dare certezza alle opinioni scientifiche.

Secondo *Galilei*, infatti, l'universo, non può essere compreso se

non s'impara a intendere la lingua e conoscere i caratteri ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile intenderne umanamente la parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

<sup>12</sup> Righini A., *Galileo tra scienza, fede e politica* (Editrice Compositori) 2008.

È in questo passo che emerge la portata rivoluzionaria del pensiero galileiano: rifiutando sia la separazione tra il punto di vista matematico e quello fisico (che il cardinale *Bellarmino* aveva indicata nella sua lettera a *Foscarini*), sia il metodo della ricerca della verità fondato *non nell'universo o in natura, ma per usare le parole* dei filosofi peripatetici, sul *confronto dei testi Galilei* si arrogò quella libertà di esame e di interpretazione dei fatti proibita dai teologi.

4. Fu *Platone* (il filosofo ateniese che vedeva nelle *idee eterne* il prototipo di ogni realtà imprecisa e impura) a proporre agli scienziati che frequentavano la sua *Accademia*, nel IV secolo a.C., il ricorso alla matematica quale strumento in grado di dare certezza alle opinioni scientifiche.

A questo proposito il filosofo greco *Simplicio*, attivo nel VI secolo d.C., nel suo *Commento al De Caelo* di *Aristotele*, racconta che *Platone* pose ai colleghi e collaboratori della sua *Accademia*, la seguente domanda:

[...] quali movimenti uniformi e ordinati conviene assumere come ipotesi per salvare i fenomeni [*le apparenze*] concernenti i movimenti dei pianeti?

La circostanza in cui *Platone* propose il suo problema è storicamente accertata in quanto (come lo stesso *Simplicio* segnala nel suo *Commento*) è ripresa da *Sosigene*, un astronomo del II secolo d.C. (omonimo dell'astronomo alessandrino che fornì a *Giulio Cesare* gli elementi necessari alla grande riforma del *calendario romano*) che, a sua volta l'aveva derivata dalla *Storia dell'Astronomia* di *Eudemo da Rodi*, un discepolo diretto di *Aristotele*, che certamente l'aveva raccolta dalla viva voce del suo maestro.

La stessa circostanza è immortalata in un mosaico del I secolo a.C., proveniente da una casa pompeiana e conservato nel *Museo Archeologico* di *Napoli*<sup>13</sup>.

Al centro del mosaico è raffigurato *Platone*, in cattedra, nell'atto di indicare con una bacchetta la *sfera celeste* posta ai suoi piedi; gli fanno da corona (a partire da sinistra di chi osserva il mosaico e procedendo in verso orario) il grande matematico *Eraclide Pontico*, famoso tra i suoi contemporanei anche per il lusso degli abiti che indossava e per la maestosità della sua figura (gli Ateniesi lo chiamarono *Eraclide Pompico*) e *Speusippo* (figlio di *Potone*, sorella di *Platone*), successore dello zio nella direzione dell'*Accademia*. Dopo *Platone*, in successione, si trovano il suo *anagrapheus* (segretario) *Filippo* da *Opunte*, l'accademico *Eudosso da Cnido* che, come astronomo, geografo, matematico, filosofo, medico e legislatore, rappresentò al meglio il carattere multiforme della cultura del suo tempo, *Senocrate* (la cui autorità nell'*Accademia* era seconda solo a *Speusippo*) e, infine, in una posizione defilata quasi a volere segnalare il suo distacco dal resto degli accademici, il giovane *Aristotele*. In effetti, la tradizione vuole che *Aristotele* preferisse la lettura al dialogo di stampo socratico posto a fondamento dell'insegnamento platonico e che, di conse-

<sup>13</sup> Berti E., *Sumphilosophiein- la vita nell'accademia di Platone*, Editori Laterza 2010.

guenza, si tratteneva nel suo studio a meditare mentre gli altri accademici partecipavano alle discussioni.

Il problema di *Platone* traeva origine dalla sua concezione del mondo che, come già aveva osservato nel *Timeo*, considerava un *cosmo*, ossia una *realtà ordinata*. (Prima di lui, partendo dallo stesso presupposto, *Pitagora* aveva ipotizzato che il moto dei corpi celesti fosse armonioso e, di conseguenza, aveva supposto che le loro distanze dalla *Terra* fossero in relazione con le lunghezze delle corde vibranti che producono le sette note della *lyra*, lo strumento con cui gli *aedi* intonavano le gesta degli *dèi* e degli *eroi*).

Questa concezione portò *Platone* a ritenere che il cielo avesse forma sferica, perché la sfera è *di tutte le figure la più perfetta e la più simile a se stessa* e che fosse animato di un moto di rotazione intorno al centro immobile della *Terra*. Egli ritenne inoltre che, all'interno del cielo, gli astri dovessero effettuare una rivoluzione circolare con velocità costante (ma diversa da corpo a corpo) perché, al contrario di tutti i moti possibili (in avanti e indietro, a destra e a sinistra, in alto e in basso), questo movimento è l'unico *perfetto*, ossia *compiuto*.

A *Platone*, naturalmente, era ben nota la profonda differenza tra il moto apparente delle stelle più lontane dalla *Terra* e quello del *Sole*, della *Luna* e degli altri corpi celesti: le prime, infatti, durante il moto si mantengono a distanza reciproca costante descrivendo con regolarità le proprie traiettorie circolari (l'impossibilità di qualsiasi movimento relativo tra le stelle portò ad immaginarle incastonate sulla superficie di una sfera, la *volta celeste*, e ad assegnare al sistema *stelle-volta celeste* la denominazione di *cielo delle stelle fisse*); gli altri corpi celesti, distinti dalle stelle fisse, al contrario, sono animati di quel moto irregolare che portò i *Greci* antichi a denominarli *pianeti* (*corpi vaganti*).

Accade così che il *Sole*, pur percorrendo una traiettoria circolare, rispetto all'orizzonte terrestre sorge e tramonta, ogni giorno, in ore diverse e in punti diversi e, rispetto allo stesso orizzonte, descrive un arco di circonferenza più alto in estate e più in basso in inverno. Esso, inoltre, impiega 187 giorni per passare dall'*equinozio primaverile* a quello *autunnale* e 178 giorni per il passaggio inverso.

Irregolari, e diversi da quelli del *Sole*, sono anche i movimenti della *Luna* che, durante circa un mese, presenta quattro *fasi*: brilla pochissimo (*Luna nuova*) quando si trova tra la *Terra* e il *Sole*; moltissimo (*Luna piena*) quando è la *Terra* a frapporsi al *Sole*; si mostra come *Luna crescente* e *Luna calante* quando non è allineata con il *Sole* e la *Terra*.

Quanto agli altri corpi celesti, l'osservazione del cielo mostra come questi siano soggetti a *stazioni* e *retrogradazioni*: *Marte*, ad esempio, nei 687 giorni impiegati per completare la sua orbita, dapprima riduce la propria velocità fino al completo arresto, quindi esegue un moto *retrogrado* e, infine, dopo un secondo *stazionamento*, riprende il moto diretto sulla sua orbita.

Nel *Timeo*, *Platone* assimilò il moto irregolare dei pianeti a una danza che, interpretata correttamente, avrebbe consentito a ciascun uomo di conoscere il proprio

futuro. Si trattò di una deriva pseudoscientifica dell'astronomia che diede fondamento teorico all'*astrologia*, una sorta di religione degli astri che fu ripresa dal grande astronomo alessandrino *Claudio Tolomeo* e che alimentò, dalla fine del 1400 alla fine del 1600, numerose dispute alle quali non si mantennero estranei neppure *Galilei* e *Kepler*.

Con i presupposti richiamati, il problema di *Platone*, in ultima istanza, era ricondotto alla ricerca dell'ordine sottostante all'apparente disordine rappresentato dalle irregolarità del moto dei pianeti e, dal punto di vista della *Geometria*, era ridotto (prendendo a prestito una locuzione propria dell'*Analisi armonica*) alla scomposizione dei moti osservati nello *spettro* dei moti circolari uniformi loro componenti.

Questa scomposizione fu ottenuta da *Eudosso da Cnido*, che introdusse un complesso sistema di sfere, tutte concentriche alla *Terra* (*sfere omocentriche*), ciascuna ruotante con velocità uniforme attorno a un asse fisso rispetto alla superficie della sfera di raggio immediatamente maggiore.

Con il suo sistema astronomico *Eudosso* riuscì a descrivere il moto dei pianeti lungo orbite aventi la forma che la cifra 8 assume quando è tracciata su una sfera e, di conseguenza, riuscì anche a dare conto degli stazionamenti e delle retrogradazioni dei pianeti. A questa orbita *Eudosso* diede il nome di *ippopede* (che, letteralmente, ha il significato di *ceppo per cavalli*) per la sua somiglianza con lo strumento che veniva posto alle caviglie di questi animali per tenerli fermi.

*Aristotele*, che fu presente al dibattito suscitato dal problema di *Platone* (entrato nell'*Accademia* come allievo nel 367 a.C., quando aveva 17 anni, vi rimase, da accademico, fino al 347, anno della scomparsa del fondatore), non contribuì alla sua soluzione. Il suo interesse per campi del sapere diversi da quello della matematica lo portò a dare credito al modello delle sfere omocentriche che, tuttavia, emendò per adeguarlo al proprio sistema filosofico. Egli giustificò le modifiche introdotte osservando che, tra le scienze matematiche l'astronomia è quella che più si approssima alla filosofia in quanto:

[...] ha come oggetto delle sue indagini una sostanza che è sensibile ma eterna, mentre [...] l'aritmetica e la geometria non hanno a che fare con alcuna sostanza.

Il passo aristotelico, che fu alla base del dissidio insanabile tra *Bellarmino* e *Galilei* (il primo attribuiva alla teoria eliocentrica il valore di una mera ipotesi matematica, l'altro considerava le scoperte astronomiche con il cannocchiale vere e proprie conoscenze della realtà fisica), segnala un punto fondamentale della sua filosofia: qualunque teoria deve essere confermata dall'esperienza e l'esperienza è tutto ciò che è procurato dai sensi. (Nel *De Caelo*, *Aristotele* critica quei pensatori che fanno confermare le loro teorie *non dall'osservazione* [...], *ma piuttosto dalle loro argomentazioni*).

Un fondamentale precursore della impostazione aristotelica del problema della conoscenza fu *Socrate*, il filosofo che, con i suoi ragionamenti e con i suoi *dialoghi*, affascinò i vecchi e i giovani ateniesi e, tra questi, *Platone*. Ne dà notizia *Aristofane*, il celebre commediografo ateniese che, nelle *Nuvole* (423 a.C.), parodiò le speculazioni di *Socrate* e dei suoi discepoli inquadrando, anche se in forma sconsiderata e



con lazzi che non di rado eccedono il limite del buon gusto, nell'ambito delle concezioni religiose e scientifiche che si erano diffuse nell'epoca di *Pericle*.

Protagonista della commedia è l'avarò contadino ateniese *Strepsiade*, padre di un giovane perdigiorno, *Fedippide* che, con la sua mania per i cavalli, occupava il suo tempo dissipando i beni di famiglia.

Per porre argine a questa frana di debiti, *Strepsiade* decide di affidare l'educazione del figlio a *Socrate* e ai suoi discepoli che, in una casuccia (il *Phrontistèrion* o *Pensatoio*), svolgevano le loro ricerche separati dal mondo.

Nella commedia *Socrate* è rappresentato come un pericoloso dissacratore (*prima cosa, da noi gli dèi non hanno corso!*), dedito allo studio della natura attraverso l'esame di fenomeni fisici poco o punto rilevanti (del tipo: *quanti piedi, naturalmente suoi, salterebbe una pulce*, o anche: *le zanzare cantano con la bocca oppure col didietro?*) condotte, e questa è la parte interessante, con il metodo sperimentale e con l'osservazione sistematica.

Per misurare i *piedi* della pulce, ad esempio

scioglie un po' di cera, acchiappa la pulce e ci infila dentro i piedi. Appena fredda, neanche babbucce orientali: gliele sfila e piglia la misura!

Ecco anche la spiegazione del *canto* della zanzara.

La zanzara ha l'intestino stretto, per essere stretto l'aria passa a viva forza, dritto al deretano. Dopo lo stretto però trova largo: quello del culo, che riecheggia per forza del soffio.

Le altre ricerche socratiche a cui fa riferimento *Aristofane* riguardano l'astrologia:

l'altro giorno s'è persa una grossa scoperta, per via di una tarantola (allude a Socrate). [...] Di notte studiava corsi e ricorsi della luna, la bocca per aria: una tarantola ci caca dentro, dal tetto!

la geometria: *ecco la mappa del mondo: vedi, questa è Atene* e la strumentazione scientifica impiegata.

Si tratta di argomenti e di metodi che, in *Atene*, aveva introdotto *Anassagora*, lo scienziato ionico alla cui filosofia, molto probabilmente, fa riferimento il titolo dell'opera di *Aristofane*<sup>14</sup>.

5. La condanna emessa dalla *Congregazione dell'Indice* nella seduta del 25 febbraio del 1616 non aveva colpito direttamente *Galilei* che anzi, convocato il giorno successivo dal Cardinale *Bellarmino*, fu accolto con molto riguardo e invitato in modo amichevole a evitare conflitti con il *Sant'Uffizio*.

<sup>14</sup> *Aristofane: le commedie*. Newton & Compton editori, 2003.

*Galilei* ebbe una ulteriore manifestazione della benevolenza delle autorità ecclesiastiche nel 1626, quando *Il Saggiatore* uscì indenne dal giudizio dell'*Inquisizione*.

Furono probabilmente questi segnali che indussero lo scienziato pisano a considerare solo formale il divieto di scrivere sulla teoria copernicana e a persuaderlo che sarebbe stato sufficiente procedere *in pura ipotesi matematica* per evitare qualunque tipo di sanzione,

Con questa convinzione, verso la fine del 1625, pose mano al *Discorso su flusso e riflusso del mare*, fenomeno che, sbagliando, considerava la prova fisica del moto della *Terra*.

Per una serie di contrarietà (che confidò nel 1629, all'amico *Cesi*), il *Discorso sulle maree* fu completato solo nel 1630.

Ma l'opera sembrava nata sotto una cattiva stella: convinto che la pubblicazione del *Dialogo* avrebbe fornito un importante sostegno alla teoria copernicana, *Urbano VIII* tardava a concedere l'*imprimatur*. Dopo molti ripensamenti, anche grazie alla mediazione del *Maestro del Sacro Palazzo*, il domenicano *Niccolò Riccardi*, il Papa diede la sua autorizzazione alla stampa non senza imporre, tuttavia, la condizione che il titolo dell'opera fosse modificato in *Dialogo intorno ai due massimi sistemi del mondo* e che, nella prefazione al testo, l'autore si fosse dichiarato d'accordo con l'editto emesso, nel 1616, dai teologi del *Sant'Uffizio*. Le condizioni imposte dal Papa furono dettate, molto probabilmente, dalla sua preoccupazione di evitare che il titolo originario dell'opera e la relativa prefazione facessero emergere in modo troppo esplicito l'orientamento dell'autore a favore delle idee copernicane. Le parti concordarono infine che gli oneri di stampa ricadessero sull'*Accademia dei Lincei*.

Dopo un ulteriore ritardo, determinato dalla morte (1630) di *Federico Cesi*, che si era fatto carico delle spese di stampa, nel maggio del 1631 a *Galilei* giunse, insieme all'atteso *imprimatur* romano, la proposta dell'Università di *Padova*, di occupare la sua antica cattedra di matematica. Ignorando la tempesta che si andava addensando sul suo capo, *Galilei*, che da poco aveva ricevuto la cittadinanza fiorentina, rinunciò alla cattedra e, con questa, anche alla garanzia, offerta dalle autorità venete, di stampare immediatamente la sua opera.

Il *Dialogo intorno ai due massimi sistemi del mondo* fu stampato nel 1632, e il favore che incontrò fu pari alla violenza della reazione che generò nelle congregazioni ecclesiastiche: l'efficacia con cui *l'autore*, esponendo i principi della nuova *filosofia naturale*, superava la vecchia fisica aristotelica, il modo spregiudicato con cui si faceva beffe del linguaggio paludato per ridicolizzare *Simplicio*, il personaggio che nei dialoghi, difende le teorie aristoteliche adottando argomenti molto simili a quelli solitamente usati dal Papa, rese ineluttabile il suo rinvio dinanzi al commissario del *Sant'Uffizio*.

Gli interrogatori ebbero inizio il 12 aprile del 1633, a *Roma*: la pena per *Galilei*, qualora fosse stato riconosciuto colpevole di disubbidienza al precetto della Santa Chiesa del 1616, sarebbe stata l'abiura delle sue teorie e il carcere.

Durante il successivo interrogatorio del 28 aprile *Galilei* riconobbe che: *è stato*

*l'error mio, di una vana ambizione e di pura ignoranza et inavvertenza* ma propose anche che gli fosse concessa la possibilità di aggiungere ulteriori due giornate al *Dialogo* al fine di confutare gli argomenti della *falsa e dannata* teoria copernicana.

La richiesta di *Galilei*, che probabilmente, le autorità ecclesiastiche interpretarono come l'estremo tentativo di evitare la condanna del suo libro, non fu accolta, ma lascia intendere che tra lui e i membri del tribunale ecclesiastico esistesse un margine, seppure sottile, di trattativa.

Quali furono gli eventi successivi è noto: vestito con l'*abitello giallo* e con in capo il *cappello a cono* dei penitenti, *Galilei* ascoltò in ginocchio la lettura della sentenza del tribunale:

[...] ordiniamo che per pubblico editto sia proibito il libro de' Dialoghi di Galileo Galilei. Ti condanniamo al carcere formale [...] riservando a noi facoltà di moderare, mutare, o levare in tutto o parte, le suddette pene.

e, subito dopo, abiurò la teoria copernicana non senza riconoscere a se stesso il merito scientifico di avere dato alle stampe un libro *ove tratto la stessa dottrina e apporto ragioni con molta efficacia a favore di essa*.

Al termine della drammatica cerimonia, *Galilei* fu prima incarcerato nel palazzo romano del *Granduca di Toscana*, quindi tradotto a *Siena*, nel palazzo dell'Arcivescovo *Ascanio Piccolomini* e, infine confinato nella sua bella proprietà in *Arcetri*. La durezza degli arresti domiciliari in cui si trovò ristretto fu mitigata dalla compagnia di numerosi visitatori e dalla notizia che la traduzione del suo *Dialogo* aveva accresciuto in modo significativo il numero di lettori.

Nel *carcere di Arcetri*, a causa di una *cataratta bilaterale*, divenne completamente cieco e la menomazione gli impedì di continuare gli studi di astronomia mai abbandonati. (Nel 1637 raccontò di aver verificato che i bordi della faccia che la luna mostra alla *Terra*, durante le ore di osservazione con il cannocchiale, subiscono modifiche misurabili e, correttamente, ricondusse questo fenomeno, noto come *librazione della Luna*, alle variazioni della posizione della *Luna* rispetto all'osservatore terrestre).

Ad *Arcetri* *Galilei* portò a termine la stesura dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali*, il capolavoro pubblicato a *Leida* nel 1638, alla cui rielaborazione era ancora impegnato nel 1642, quando la morte sopravvenne a dare pace al suo *inquieto cervello*.

I *Discorsi* riproposero il genere letterario del dialogo tra *Simplicio* (rappresentante della scienza rispettosa dell'autorità dei testi classici), *Sagredo* (uomo profano ma colto e aperto alle novità scientifiche) e *Salviati* (esponente della nuova scienza), al quale spettava il compito di riferire, nell'arco di quattro giornate, quanto appreso dal *nostro Accademico*.

Nel 1674, il suo allievo *Vincenzio Viviani* arricchì l'opera di una *quinta giornata* (*Da aggiungersi all'altre quattro de' Discorsi*) dedicata alla trattazione dei temi geometrici che aveva appreso dalla viva voce del maestro, ormai afflitto dalla cecità. A *Viviani* si deve anche l'esperimento ideato da *Evangelista Torricelli* per la misura

della *forza* dell'*horror vacui* postulato da *Aristotele*. *Torricelli* era stato, a *Roma*, un brillante allievo di *Benedetto Castelli*: diventato collaboratore di *Galilei* (nel 1641), grazie al suo elevatissimo valore scientifico, fu dal *Nostro* designato come suo successore nel posto di *Primo Matematico Granduca*.

Nel 1718 i *Discorsi* furono completati con la *Giornata sesta del Galileo. Della forza della percossa*.

Gli argomenti delle prime due giornate, dal titolo *Scienza nuova prima, intorno alla resistenza dei corpi solidi all'essere spezzati e Qual potesse essere la causa di tal coerenza* riguardano

quella resistenza che hanno tutti i corpi all'esser rotti e il modo con cui questa resistenza si manifesta nei prismi e cilindri simili o dissimili in figura, lunghezza e grossezza essendo però dell'istessa materia.

Gli argomenti delle ultime due giornate, dal titolo *Scienza nuova altra, dei movimenti locali; cioè dell'equabile* (moto uniforme); *del naturalmente accelerato* e *Del violento, ovvero dei proietti*, trattano questioni che *Galilei* aveva affrontato durante il periodo padovano, osservando il moto rettilineo di una sfera su una superficie inclinata rispetto ad un piano orizzontale e il *moto parabolico*.

6. Nella prima giornata *Salviati* si diverte a stupire i suoi interlocutori presentando una situazione apparentemente contraria al senso comune (*praeter spem*, esclama *Simplicio*):

Era una grossissima colonna di marmo distesa e posata, sopra alle sue estremità, sopra due pezzi di trave; [...] un *Mecanico*, preoccupato che la colonna potesse rompersi nel mezzo, decise di inserire un terzo appoggio di legno proprio in questa posizione. [...] parve il consiglio generalmente molto opportuno, ma l'esito lo dimostrò essere stato tutto l'opposto, atteso che non passarono molti mesi che la colonna si trovò fessa e rotta giusto sopra il nuovo appoggio di mezzo.

Agli sbalorditi *Simplicio* e *Sagredo*, *Salviati* dà la seguente spiegazione del fenomeno:

[...] deposti in piana terra i due pezzi della Colonna, si vedde che uno degli appoggi in legno posti alle estremità della colonna si era, per la lunghezza del tempo, infradato e avvallato e, restando quel di mezzo durissimo e forte, accadde che la metà della colonna restasse in aria, abbandonata dall'estremo sostegno; onde il proprio soverchio peso gli fece fare quello che non avrebbe fatto, se solo sopra i due primi si fosse appoggiata, perché all'avvallarsi qual si fusse di loro, ella ancora l'avrebbe seguito.

Per tradurre questi concetti nel moderno linguaggio della *meccanica dei solidi* è sufficiente identificare la colonna appoggiata ai due conci di legno con una *struttura monodimensionale isostatica* (cioè una *trave* dotata del numero di vincoli strettamente necessario per evitare moti o spostamenti rigidi), e la colonna appoggiata

ai tre concetti di legno ad una *struttura iperstatica* (trave dotata di vincoli *sovrabbondanti*). Nel primo caso la trave si adatta al cedimento di uno dei due appoggi ruotando rigidamente (senza cioè subire alcuna deformazione) intorno all'altro vincolo; nel caso di struttura iperstatica, al contrario, il cedimento di uno dei vincoli può non essere sufficiente a determinare il moto rigido del solido che, di conseguenza, si adatta alla nuova condizione *deformandosi* (*il proprio sovrabbondante peso gli fece fare quello che non avrebbe fatto, se solo sopra i due primi si fosse appoggiata*).

Sollecitato da *Sagredo* a illustrare il problema dell'origine della *resistenza dei solidi*, *Salviati* sostiene che:

[...] la coerenza delle parti di un corpo [...] ha due capi: l'uno de i quali è quella decantata ripugnanza che ha la natura all'ammettere il Vacuo; per altro bisogna (non bastando il Vacuo) introdurre qualche glutine, visco o colla, che tenacemente colleghi le particole delle quali esso corpo è composto.

La soluzione indicata da *Salviati* nella prima giornata per spiegare la resistenza dei corpi, delinea effettivamente una *Nuova Scienza* con la quale, pur ricorrendo alla teoria aristotelica dell'impossibilità del vuoto (*horror vacui*), è introdotta una vaga e grossolana concezione atomica della materia, diversa da quella di *Democrito* (che faceva risiedere nell'atomo e nel vuoto i principi delle cose) e mai completamente abbandonata dagli studiosi successivi.

Nella seconda giornata *Salviati* porta all'attenzione dei suoi interlocutori il differente comportamento esibito, nei riguardi della rottura, da un solido (cilindrico o prismatico) avente un estremo saldamente incastrato (*fitto*) in un muro e l'altro estremo libero, secondo che il carico sia applicato *per lo lungo* (lungo l'asse), o trasversalmente all'asse

e così vegghiamo una verga, per esempio di acciaio o di vetro, reggere per lo lungo il peso di mille libbre, ma che, fitta a squadra in un muro si spezzerà con l'attaccaglierne cinquanta solamente.

Egli enuncia anche quello che, tuttora, è designato come *Problema di Galilei*: la *resistenza a rottura* di una trave incastrata ad un estremo e *caricata* (trasversalmente all'asse) *d'un peso alla sua estremità libera* (*trave a mensola*).

La trattazione che *Galilei* fece di questo problema prescinde dal fatto che, prima di giungere alla rottura, due mensole che differiscono tra loro solo per il materiale di cui sono costituite, possono flettersi (deformarsi) in misura molto diversa; nei fatti questa impostazione lo portò ad assimilare i solidi cilindrici o prismatici sotto carico, agli astratti solidi di *Euclide* e ad applicare a questi le regole elementari della geometria e quelle della statica enunciate dal *divino Archimede*.

Le leggi fisiche che dedusse con questa impostazione risultarono indipendenti dai materiali costituenti i corpi e, di conseguenza, assunsero il valore di verità geometriche; ad esse lo stesso *Galilei* aggiunse numerosi corollari.

I successori di *Galilei* gradualmente sostituirono al suo schema di corpo rigido quello, più aderente alla realtà, di *corpo continuo deformabile sotto l'azione di carichi*

*esterni*. Il dibattito scientifico che di conseguenza si sviluppò, portò al graduale passaggio dall'ingenuo *horror vacui* alla rappresentazione dei materiali come un *continuo fisico-matematico* e alla formulazione di nuove leggi fisiche, denominate *leggi costitutive*, in grado di correlare, attraverso un opportuno e molto specialistico formalismo matematico, per ogni specifico *mezzo continuo*, l'azione dei carichi alle corrispondenti deformazioni<sup>15</sup>.

Nelle due ultime giornate dei *Discorsi, Salviati* discute di quelle ricerche di *teoria del moto* che, a *Padova*, *Galilei* aveva sviluppato prescindendo dalle cause determinatrici dei diversi movimenti osservati e analizzando solo le modalità con cui questi si manifestavano. L'impostazione adottata gli consentì di concepire il moto dei *proietti* come la combinazione di un moto orizzontale uniforme e di un moto di caduta verticale uniformemente accelerato e, di conseguenza, di rappresentare la corrispondente traiettoria con una *parabola di Apollonio* (il *grande geometra* dell'antichità, contemporaneo, ma più giovane, di *Archimede*).

Si trattò di un contributo allo studio del moto dei *proietti* particolarmente significativo soprattutto se si confrontano le sue conclusioni con quelle dei predecessori più immediati<sup>16</sup>.

*Daniel Santbech*, ad esempio, nel *Problematum astronomicorum et geometricorum sectionem septem* del 1561, aveva sostenuto che una palla di cannone, scagliata orizzontalmente, avrebbe conservato questa direzione del moto fino all'esaurimento della velocità impressa; raggiunta questa condizione, il corpo sarebbe poi caduto verticalmente.

*Niccolò Fontana*, (il matematico bolognese, noto con il nome di *Tartaglia*, che contese a *Gerolamo Cardano* il merito della scoperta della soluzione delle equazioni algebriche di terzo grado), nella sua *Nova Scientia, invenzione novamente trovata utilissima per ciascuno speculativo matematico bombardiero* (1537), aveva decomposto la traiettoria del *proietto* in un segmento rettilineo iniziale e in un arco di cerchio ad essa raccordato, dotato di tangente verticale in corrispondenza del punto di contatto con il suolo.

Entrambe le teorie traducevano l'idea che la velocità orizzontale iniziale del *proietto*, almeno nei primi istanti del moto (o nel tratto di percorso più prossimo all'origine), può annullare gli effetti della gravità. Si trattò di una possibilità che trovava la sua giustificazione nella constatazione che il rapporto tra le lunghezze del segmento verticale di caduta e del tratto orizzontale iniziale, diviene trascurabile quando la velocità orizzontale all'origine è molto elevata.

Una suggestiva conseguenza di questa interpretazione è illustrata dal caso della locomotrice di un treno che, se è ferma su un ponte fatiscente, lo distrugge, ma se è animata di velocità sufficientemente elevata, può attraversarlo senza conseguenze.

<sup>15</sup> Truesdell C., *The rational mechanics of flexible or elastic bodies. Introduction to Leonhardi Euleri opera omnia*, Turici, 1960.

<sup>16</sup> Mach E., *La meccanica nel suo sviluppo storico critico*, Universale Bollati Boringhieri Serie Scientifica 161/162.

Con la decomposizione del moto dei *proietti* in due moti indipendenti, uno orizzontale (di velocità pari a quella impressa), l'altro verticale di caduta (con velocità iniziale nulla), *Galilei* aprì la strada alla definizione della *composizione delle forze* ma, soprattutto mise se stesso nella condizione di trattare in modo estremamente efficace il problema della *relatività del moto* dei corpi nel *Dialogo sopra i due massimi Sistemi del Mondo*.

Per queste ricerche *Galilei* utilizzò il *piano inclinato*, lo stesso dispositivo che aveva impiegato per lo studio delle questioni di statica. Le esperienze furono condotte facendo rotolare una sfera entro un solco rettilineo praticato secondo la direzione di massima pendenza del piano inclinato e misurando gli intervalli di tempo necessari perché questa completasse un percorso rettilineo di lunghezza assegnata.

La misura del tempo fu eseguita con un *cronometro ad acqua* costituito da una botte di legno di capacità molto grande, parzialmente riempita d'acqua, al cui fondo aveva aperto un foro con sezione molto minore della sezione minima della botte. Il foro veniva aperto quando la sfera iniziava il suo moto lungo il piano inclinato, e chiuso nell'istante in cui la sfera raggiungeva la fine di un percorso stabilito. Il volume d'acqua effluita dal foro nell'intervallo di tempo compreso tra l'inizio e la fine della prova era raccolto in un recipiente posto su una bilancia. Questo volume costituiva una frazione piccolissima di quello contenuto nella botte che pertanto, con ottima approssimazione, poteva considerarsi costante nel corso di ciascuna prova. La costanza del volume liquido nella botte rendeva il tempo di efflusso direttamente proporzionale al peso effluito dal foro e, di conseguenza, con grandissima precisione, consentiva di risalire al primo attraverso la misura del secondo.

Misure ripetute lo condussero ad attribuire al tempo di caduta il ruolo di fattore determinante della velocità di caduta.

Non si trattò di un risultato originale: prima di lui una rappresentazione grafica del moto di caduta dei gravi era stata data, nel *De Configuratione qualitatum* del XIV secolo, da *Nicola d'Oresme* (il rettore del *Collège de Navarre* autore del *Tractatus de latitudinibus formarum*, con il quale tracciò gli inizi di una geometria basata sulle coordinate). La fondamentale innovazione di *Galilei* riguardò il modo con cui generalizzò questi risultati: ponendo in relazione con il tempo, separatamente, la velocità  $v$  e lo spazio  $s$  di caduta, egli ottenne infatti due delle tre *equazioni del moto uniformemente accelerato*:  $v = at$  e  $s = \frac{1}{2} at^2$  (con  $a$  accelerazione costante del corpo).

La prima delle due equazioni consentì a *Newton* di stabilire i concetti e le leggi su cui fondare il suo modello della meccanica: introdotto il concetto di *massa* ( $m$ ), e di *forza* ( $f$ ), da essa ricavò infatti  $mv = ft$ .

A *Galilei* non riuscì di porre in relazione la velocità di caduta con lo spazio percorso: poco esperto di algebra (ignorò sempre il rivoluzionario contenuto della *Geometria* del suo contemporaneo *Descartes*) ammise che la velocità di caduta crescesse in progressione aritmetica rispetto allo spazio percorso ( $v = Cs$ , con  $C$  costante). È molto probabile che si sia avveduto dell'errore nel 1609, ma non seppe emendarlo: in questo modo lasciò al grande fisico olandese *Christiaan Huygens*

(1629-1695) il merito di introdurre la relazione corretta  $v^2 = 2a s$ , e di attribuire anche allo spazio di caduta il ruolo di fattore determinante della velocità.

7. *Galilei* analizzò anche il caso di una sfera che, dopo essere discesa lungo un piano declive nel senso del moto, in virtù della velocità acquisita, risale lungo un altro piano, acclive nel senso del moto, posto in prosecuzione al primo e osservò che, facendo astrazione da fenomeni secondari, la velocità di risalita (decrecente proporzionalmente al tempo), si annulla nell'istante in cui la sfera raggiunge l'altezza uguale a quella da cui è partita.

A *Galilei* non sfuggì che la velocità acquisita dalla sfera in moto lungo un piano inclinato dipende solo dalla distanza verticale tra la sommità del piano e il suo piede (altezza del piano): se infatti (così ragionò) cadendo lungo il piano inclinato, la sfera acquistasse una velocità maggiore di quella che acquisterebbe cadendo secondo l'altezza, sarebbe possibile farla risalire ad un'altezza comunque grande semplicemente disponendo in modo opportuno una serie di piani inclinati.

Questo risultato contraddice un principio di origine sperimentale, molto più antico della meccanica, che porta a negare la possibilità del moto perpetuo (*perpetuum mobile*).

Il principio dell'impossibilità di questo moto era stato usato dall'ingegnere fiammingo *Simon Stevin* (1548-1620), per lo studio delle condizioni di *equilibrio statico* di corpi posti su un piano inclinato.

*Stevin* immaginò di avvolgere un prisma con base rettangolare, spigoli orizzontali e sezione trasversale di forma triangolare con lati disuguali, con una collana di  $n$  sfere dello stesso peso ( $m$  di queste sfere appoggiate sulla faccia obliqua più piccola del prisma;  $r > m$  appoggiate sull'altra faccia obliqua; le rimanenti  $q = n - (r + m)$  sospese al di sotto della base rettangolare), e osservò che, se fosse stato possibile fare scorrere la collana sulle facce oblique, il moto di tutte le sfere avrebbe dovuto essere perpetuo: questo moto, infatti, avrebbe lasciato immutata la forma della collana e, di conseguenza, non avrebbe introdotto cause in grado di provocarne l'arresto. Ma il moto perpetuo è irrealizzabile e, di conseguenza, l'unica condizione fisicamente accettabile per la collana è l'immobilità. D'altra parte, la porzione di collana sospesa al di sotto della base del prisma, per la simmetria della sua configurazione, non può interferire con la condizione di immobilità e, pertanto, la sua eliminazione non distrugge l'equilibrio delle sfere poste sui piani inclinati. A mantenere in equilibrio le  $r$  sfere poste su una delle facce inclinate del prisma bastano, dunque, le  $m$  sfere poste sull'altra faccia inclinata.

*Stevin* si sentì così fiero del risultato conseguito da volere che il prisma utilizzato per la dimostrazione fosse riprodotto sul frontespizio degli *Hypomnemata mathematica*, l'opera in cui raccolse, nel 1608, i risultati delle sue ricerche; volle inoltre che la stessa immagine fosse riprodotta come epitaffio sulla sua tomba e che l'epitaffio fosse completato con la frase fiamminga *Wonder en is gheen wonder (la meraviglia*



*non è più meraviglia*), per indicare che, con la sua geniale dimostrazione, la condizione di equilibrio esaminata non dipende da cause misteriose ma, al contrario, si inquadra perfettamente nel complesso di conoscenze acquisite in maniera istintiva.

Alla *meraviglia* si riferì anche il trattato *Problemi meccanici* (*Μηχανικά προβλήματα*), attribuito a *Aristotele*:

Si prova meraviglia per quelle cose che accadono secondo natura di cui si ignora la causa [...]. Tale è il caso in cui il maggiore è vinto dal minore, e cose aventi piccolo peso muovono grandi pesi [...]. Alle aporie di questo genere appartengono anche quei problemi che riguardano la leva. Sembra infatti strano che un grande peso sia mosso da una piccola forza [...]. Il principio di tutte queste cose risiede nel cerchio ed è naturale: non è strano che infatti che da un fatto prodigioso derivi qualcosa di prodigioso. Ora una congiunzione di contrari è la cosa più prodigiosa, e il cerchio è appunto costituito di contrari: esso è prodotto direttamente da qualcosa che si muove e qualcosa che permane nel suo luogo.

Da questa premessa l'apocrifo *Aristotele* fece discendere la seguente conclusione: tutte le cose straordinarie che si verificano nelle macchine si riconducono alla leva e alle sue leggi. Infatti il cerchio è

la ragione prima di tutti quei meravigliosi fenomeni; poiché ciò che avviene nel braccio di una bilancia si può ricondurre al cerchio; ciò che avviene nella leva si può ricondurre al braccio di una bilancia; e quasi tutti gli altri moti delle macchine si possono ricondurre a quello della leva.

I teoremi relativi alla *leva* (un'asta rigida, *priva di peso*, posta su un punto d'appoggio detto *fulcro*) furono enunciati da *Archimede da Siracusa* nel suo trattato *De aequiponderantibus*. Il grande siracusano ammise come dato di fatto evidente di per se (*principio di ragion sufficiente*), che due pesi uguali posti a uguali distanze dal fulcro sono in equilibrio, mentre due pesi uguali posti a distanze disuguali dal fulcro, non lo sono. E in questo secondo caso, il peso applicato a maggiore distanza dal fulcro si abbassa.

Con questi presupposti *Archimede* ricavò che due pesi nella proporzione 1:2, sono in equilibrio su una leva se la distanza dal fulcro del peso 1 è il doppio della distanza dal fulcro del peso 2 (*legge della leva*).

Questa legge diviene più chiara se si immagina di far ruotare la leva di un piccolo angolo intorno al fulcro in modo che l'estremità libera del *braccio* che sostiene il peso 1 si abbassi: poiché tale braccio ha lunghezza doppia di quello su cui è posto il peso 2, lo spostamento verso il basso della sua estremità ha lunghezza doppia di quello verso l'alto dell'altra estremità. Ebbene, generalizzando, si conclude che la condizione di equilibrio statico è verificata se *i pesi spostati stanno in ragione inversa alle distanze verticali da essi percorse*.

Non può sfuggire la curiosa circostanza che discende da questo enunciato: per verificare la condizione di equilibrio statico dei due pesi è necessario che la leva ruoti intorno al suo fulcro. In realtà, la rotazione imposta alla leva e i conseguenti spostamenti dei suoi estremi non sono arbitrari ma devono essere *compatibili* con le

condizioni di vincolo (la leva presa in considerazione può solo ruotare intorno al fulcro), e tanto piccoli (*infinitesimi*) da modificare infinitamente poco le condizioni di partenza.

Spostamenti di questo tipo sono detti *virtuali* e il prodotto dei pesi dei corpi per i rispettivi spostamenti virtuali è detto *lavoro virtuale*.

L'enunciato di *Archimede* esprime dunque quel *principio dei lavori virtuali* che nei manoscritti di *Leonardo da Vinci* diventerà:

se una potentia move un corpo per alquanto spazio in alquanto tempo, la medesima potentia moverà la metà di quel corpo, nel medesimo tempo, due volte nello spazio

Con il principio dei lavori virtuali *Archimede* spiegò anche il funzionamento dei sistemi di *pulegge*.

Secondo quanto riferisce *Plutarco*<sup>17</sup>, *l'entusiasmo per il vigore della propria dimostrazione*, indusse *Archimede* a scrivere al re *Gerone*, una lettera (apparentemente temeraria) in cui dichiarava che avrebbe potuto sollevare, con la semplice forza delle braccia, un peso comunque grande e, che, anzi: *se fosse esistita un'altra Terra, egli avrebbe mosso questa trasferendosi in quella*.

In risposta al re che gli chiedeva di *ridurre in pratica la sua proposizione*, *Archimede* fece tirare in secco

un mercantile a tre alberi della flotta reale sul quale imbarcò molti uomini e il suo carico abituale, poi si sedette lontano e senza nessuno sforzo, muovendo tranquillamente con una mano un sistema di *pulegge*, lo fece avvicinare a se dolcemente e senza sussulti, come se volasse sulle onde del mare.

*Galilei* impiegò il principio dei lavori virtuali nella forma molto generale e di estrema eleganza che espose in *Le Meccaniche* con riferimento alla seguente situazione schematica: un peso  $P$  è appoggiato (senza attrito) sul piano inclinato  $\pi$  ed è collegato ad un peso verticale  $Q$  per il tramite di un filo inestensibile che può strisciare senza attrito su una carrucola fissa. Egli verificò che, in condizioni di equilibrio, quando la lunghezza del piano  $\pi$  è il doppio della sua altezza  $h$ , i pesi  $P$  e  $Q$  sono legati dalla relazione  $P = 2Q$ .

Sulla base di questo risultato (la cui generalizzazione è immediata) egli osservò che se il peso  $Q$  scende lungo la verticale per un tratto di lunghezza  $h$ , il peso  $P$  risale lungo il piano inclinato per un tratto di lunghezza  $x$  corrispondente ad uno spostamento verticale verso l'alto di lunghezza  $\frac{h}{2}$  e, di conseguenza, i prodotti dei pesi  $P$  e  $Q$  per i rispettivi spostamenti verticali sono uguali, ossia  $Qh = P\frac{h}{2}$ .

Si deve convenire con *Ernst Mach* che la trattazione galileiana, meno suggestiva ma più naturale e profonda di quella di *Stevin*,

rivela la sua grandezza di scienziato in quanto ha il coraggio intellettuale di vedere, in un fenomeno già studiato da molto tempo, più che i suoi predecessori, e di avere fiducia nella propria osservazione.

<sup>17</sup> Plutarco, Marcello, in *Vite*, Utet Torino 1996.

*Evangelista Torricelli* precisò ulteriormente il risultato del maestro osservando che l'equilibrio dei pesi  $P$  e  $Q$  sussiste quando il loro *centro di gravità* (o *baricentro*, punto in cui si può immaginare concentrato il peso del sistema) non può abbassarsi.

Verso la fine del XVII secolo l'enunciato di *Torricelli* consentì ai fratelli *Jean* e *Jacques Bernoulli* di stabilire un criterio *di natura fisica* per la definizione della configurazione di equilibrio che avrebbe assunto una catena (formata da anelli di caratteristiche identiche) sospesa per le estremità a due punti posti a data distanza sullo stesso piano orizzontale.

(*Galilei* riteneva di aver risolto lo stesso problema assimilando la forma della catena in condizioni di equilibrio, detta *catenaria*, a un arco di parabola ad asse verticale, concava verso l'alto).

I *Bernoulli*, discutendo della questione mentre passeggiavano per le strade di *Basilea* (la circostanza è ricordata da *Mach*), conclusero che, in condizioni di equilibrio, gli anelli della catena si sarebbero disposti in modo da far cadere il centro di gravità del loro insieme nel punto più in basso possibile: secondo l'enunciato di *Torricelli*, infatti, un anello della catena è in condizione di equilibrio se ad un suo spostamento verticale verso il basso corrisponde un uguale spostamento verso l'alto di un altro anello. È evidente dunque che la condizione caratterizzata dall'impossibilità di spostamento verso il basso di ciascun anello (corrispondente alla condizione in cui ogni anello della catena occupa nello spazio la posizione più bassa consentitagli dai vincoli), accompagnata dall'assenza di spostamento verso l'alto di un altro anello comporta che la configurazione assunta dalla catena è di equilibrio e che il baricentro del sistema si trova nella posizione più bassa possibile (e viceversa).

Questa conclusione di natura fisica permise di generalizzare il problema matematico della *catenaria* nella forma: *determinare quale curva di lunghezza assegnata tra due punti posti sulla stessa orizzontale ha il baricentro più basso*.

A sua volta, la generalizzazione del problema di equilibrio diede un formidabile impulso allo svolgimento formale della meccanica ed influenzò grandemente la classe di problemi riguardanti la ricerca di quei valori di una data grandezza variabile per i quali un'altra grandezza variabile in funzione della prima assume il valore massimo o minimo.

Non si trattava di un nuovo problema matematico: nell'antichità, *Pitagora* aveva insegnato che il cerchio è la figura di area maggiore tra tutte le figure piane di dato perimetro, mentre *Erone* aveva fondato la sua *legge di riflessione* dei raggi luminosi sull'ipotesi che un raggio di luce partito da un punto dello spazio e riflesso in un dato punto di una superficie piana riflettente, raggiunge il punto di arrivo seguendo il percorso più breve. Fu tuttavia la formulazione dei *Bernoulli* a condurre *Leonhard Euler* e, successivamente *Joseph Louis Lagrange* alla scoperta dell'insieme di quei metodi noti oggi con la denominazione di *calcolo delle variazioni*.

*Galilei* sottopose a verifica sperimentale anche le sue conclusioni sui moti di caduta di gravi su *una successione di piani inclinati* (esaminò a questo scopo le oscillazioni di un *pendolo semplice*, una sfera pesante sospesa a un filo sottile di lunghezza

l'intorno alla posizione verticale di riposo e concluse che, *fatta astrazione dalla resistenza dell'aria*, la sfera, abbandonata a se stessa, ossia con *velocità iniziale nulla*, dopo essere stata posta, con il filo teso, a una data distanza verticale *b* da un piano orizzontale, raggiunge, con *velocità finale nulla*, la medesima distanza dallo stesso piano nella zona simmetricamente opposta rispetto alla verticale di riposo.

Con il semplice accorgimento di porre, in un piano parallelo a quello di oscillazione e in corrispondenza di un punto del segmento verticale compreso tra il sostegno della sfera e la sfera stessa, un chiodo di lunghezza tale da interferire con il moto del pendolo, analizzò anche i casi in cui le oscillazioni non sono simmetriche rispetto alla posizione di riposo. In questo modo verificò che, quando il chiodo è infisso in una posizione tale da impedire alla sfera di risalire fino all'altezza compatibile con la massima velocità acquisita, il filo si avvolge intorno ad esso. Munito di questi risultati e in virtù della straordinaria capacità di adattare le sue deduzioni ai fatti sperimentali, *Galilei* enunciò la *legge di inerzia* (in assenza di cause modificatrici del moto, un corpo conserva indefinitamente la velocità e la direzione del suo moto) e confutò l'opinione secondo cui i corpi di peso maggiore cadono più velocemente di quelli di peso minore.

8. Il 1633 è l'anno in cui *Descartes*<sup>18</sup>, decise di non dare alle stampe il trattato (da poco completato) *Le monde ou traité de la lumière*, in cui assumeva come vera la teoria eliocentrica. Infatti, se, come lasciava presumere la vicenda giudiziaria di *Galilei*, questa teoria si fosse rivelata falsa,

anche tutti i fondamenti della mia Filosofia diventerebbero tali, giacché da essi il moto della Terra si dimostra come affatto evidente. D'altra parte, questa teoria è così connessa a tutte le parti del mio trattato che non potrei eliminarla senza rendere il testo difettoso. Non volendo però per nulla al mondo essere l'autore di un discorso ove si trovi la pur minima parola disapprovata dalla Chiesa, preferirei sopprimerlo interamente piuttosto che farlo apparire mutilato.

Nel trattato, che non fu soppresso ma fu pubblicato postumo nel 1664, *Descartes* immagina che *Dio*, dopo aver creato la *materia* (intesa come *vero corpo perfettamente solido che riempie allo stesso modo tutte le lunghezze, larghezze e profondità del grande spazio*), le abbia impresso il movimento retto dalle seguenti tre leggi fondamentali:

[...] ogni parte della materia in particolare persiste nel medesimo stato finché l'urto delle altre non la costringe a mutarlo.

[...] quando un corpo ne spinge un altro, non può comunicargli alcun movimento senza perderne contemporaneamente altrettanto del proprio; né sottrarglielo senza aumentare il proprio nella stessa misura

[...] quando un corpo si muove, benché il suo movimento avvenga per lo più secondo

<sup>18</sup> Cartesio in *I Grandi filosofi*, opere scelte a cura di A. Massarenti, Il Sole 24 ore SpA, 2006.

una curva e ogni movimento [...] sia sempre in qualche modo circolare, tuttavia, le sue parti, singolarmente prese tendono sempre a continuare la loro linea retta.

Secondo *Descartes* queste leggi devono essere completate con quelle che derivano dalle verità eterne (cioè le verità matematiche stabilite da *Dio*) e

chi saprà esaminare [...] le conseguenze di tali verità e delle nostre regole potrà conoscere gli effetti dalle cause; [...] e potrà avere dimostrazioni a priori di tutto ciò che può essere prodotto in questo nuovo mondo.

Questa affermazione sottolinea l'abissale distanza che separava gli universi concettuali di *Galilei* e di *Descartes* e giustifica la scarsa considerazione che i due scienziati si reciprocavano.

Al contrario di *Descartes*, che riponeva una fiducia assoluta nelle proprie idee e, di conseguenza trascurava l'importanza delle deduzioni sperimentali (*Pascal*, *Huygens* e *Leibniz* non esitarono a considerare semplici fantasie molti concetti fisici cartesiani), *Galilei* associò sempre all'esame logico delle sue ipotesi la rigorosa verifica sperimentale. Per altro verso, tuttavia, la sua rinuncia alla ricerca del *perché* dei fenomeni osservati gli rese sempre problematica la loro interpretazione meccanica.

Emblematica a questo riguardo è la piena contraddizione con il *principio di relatività* (enunciato in modo ammirevole nel *Dialogo* del 1632) in cui incorse nell'interpretazione delle maree. Se, infatti, come aveva suggerito nel *Dialogo*, si fosse *rinserrato con qualche amico* in una stanza *sotto coverta di un gran naviglio* e avesse posto in rotazione uniforme un *gran vaso d'acqua*, avrebbe osservato che, *mentre il vassello sta perfettamente fermo*, la superficie libera del liquido, durante la rotazione del recipiente, si sarebbe stabilmente innalzata in corrispondenza delle pareti e abbassata in corrispondenza dell'asse di rotazione. Ripetendo l'esperimento con la nave in moto *con quanta si voglia velocità purché il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là*, non avrebbe rilevato neppure *una minima mutazione in tutti li nominati effetti* (e, quindi neppure quello sciabordio dell'acqua contro le pareti del recipiente che riteneva equivalente al flusso e riflusso del mare in rotazione con la *Terra*) sicché non avrebbe potuto comprendere *se la nave cammina o pure sta ferma*.

Anche le leggi dell'urto, così strettamente legate ai principi della meccanica, sfuggirono alla sua interpretazione. A questo scopo *Galilei* aveva predisposto il seguente ingegnoso esperimento: un recipiente pieno d'acqua, munito sul fondo di un piccolo foro inizialmente chiuso, era legato con dei fili ad un secondo recipiente vuoto; entrambi i recipienti erano posti (il primo al di sopra del secondo) su un braccio di una bilancia in equilibrio.

L'esperimento ideato da *Galilei* consisteva nel raccogliere nel recipiente vuoto l'acqua che effluiva, sotto forma di *getto*, dal foro; egli si aspettava che l'urto del getto sul recipiente raccogliitore avrebbe determinato un abbassamento del braccio della bilancia e che, a determinare la *forza della percossa*, sarebbe stato il contrappeso necessario per ripristinare l'equilibrio.

Con suo grande stupore l'esperimento non diede luogo al risultato atteso: dopo

un'iniziale rotazione intorno al fulcro che sollevò il braccio che sosteneva i due recipienti, infatti, la bilancia tornò nella iniziale posizione di equilibrio.

Le ragioni di questo insuccesso sono oggi alla portata di un (diligente) allievo ingegnere: il sollevamento del braccio all'atto dell'apertura del foro è, infatti, determinato dalla *reazione d'efflusso* che il getto esercita sul liquido contenuto nel recipiente munito di foro; le successive condizioni di equilibrio raggiunte non appena il dispositivo è in piena attività, sono giustificate dalla compensazione tra il peso sottratto alla bilancia dalla porzione di liquido in aria e la differenza tra la cercata *forza della percossa* (verso il basso) e la reazione d'efflusso (verso l'alto).

Il problema dell'urto trovò una soluzione scientifica soddisfacente solo molti anni dopo l'infruttuoso tentativo di *Galilei*. Su invito della *Royal Society* di Londra, che nel 1668 aveva sottoposto il problema alla comunità scientifica, nel 1669 *Huygens* espose le sue idee in uno scritto pubblicato nell'opera postuma *De motu corporum ex percussione* del 1703.

9. La scienza può diffondere morte. È probabile che questa indesiderata deriva della conoscenza sia stata compresa dai terroristi che, l'11 settembre del 2001, fecero schiantare due aerei di linea a pieno carico (di passeggeri e carburante) contro le torri del *World Trade Center*. Ma, al contrario di ciò che essi pensavano, il crollo degli edifici non fu conseguenza dell'impatto (la *forza della percossa*, avrebbe detto *Galilei*) che pure determinò lo squarcio di parte delle pareti perimetrali e delle colonne d'acciaio, e la fuoriuscita di gran parte delle sessanta tonnellate di carburante contenute nei serbatoi dei velivoli; e neppure fu conseguenza della deflagrazione conseguente alla combustione del carburante (l'intensità della forza di espansione dei gas dovuta alla deflagrazione non fu sufficiente a frantumare il conglomerato cementizio).

Il crollo fu determinato dal fuoco alimentato dal carburante dell'aereo (e da tutto il materiale infiammabile presente all'interno dell'edificio) che portò la temperatura dell'ambiente fino a 800°C.

In presenza di questa temperatura le colonne in acciaio dell'edificio si indebolirono e si deformarono (fecero quello che non avrebbero fatto nelle condizioni previste in progetto, avrebbe detto *Galilei*) perdendo, di conseguenza, la loro funzione di sostegno dei carichi sovrastanti. Gli stessi carichi furono allora assorbiti da quelle colonne e dal nucleo centrale in cemento armato ancora in grado di svolgere la loro funzione e che, progressivamente, andavano indebolendosi. Al collasso della prima delle colonne superstiti seguì, in rapida successione, quello delle rimanenti fino a che l'intero solaio (e tutta la parte dell'edificio al di sopra di questo), non più sostenuto, precipitò sul solaio sottostante.

La *forza della percossa* che si scaricò su questo solaio, per effetto della velocità di caduta, si moltiplicò rispetto al peso proprio (il fattore di moltiplicazione è stato stimato dell'ordine di 20) sicché le colonne che lo sostenevano cedettero. Il mecca-

nismo distruttivo si replicò facendo così collassare su se stesso l'intero edificio un piano alla volta alla *velocità di caduta libera*.

Quando si riesce a superare il raccapriccio che si prova osservando l'evento, si riconosce che a chiarire la evoluzione dei processi coinvolti nel crollo bastano quei principi che *Galilei* enunciò in maniera definitiva nei *Discorsi* del 1638.