

Università degli studi di Catania

Corso di laurea in fisica

*Tesina di Epistemologia e Storia della Fisica
su Galileo Galilei*



Agata Trovato

Biografia

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564 da Giulia Ammannati e Vincenzio Galilei, entrambi appartenenti alla media borghesia. La famiglia si trasferì a Firenze nel 1574, dove Galileo compì i primi studi di retorica, grammatica e logica nel monastero camaldolese di Vallombrosa ed entrò a far parte dell'ordine come novizio. Il padre, un musicista fiorentino, nutrendo ben altri progetti per il figlio, lo fece tornare a Pisa per farlo iscrivere a Medicina. I testi di Galeno e le opere biologiche di Aristotele, però, non lo interessavano quanto le lezioni su Euclide di Ostilio Ricci, che lo orientavano verso la geometria e la matematica. Le sue prime indagini nel campo della fisica lo portarono, nel 1583, a scoprire l'isocronismo delle oscillazioni pendolari e, negli anni seguenti, a determinare il peso specifico dei corpi tramite un congegno chiamato "bilancetta", simile ad un utensile già in uso presso i mercanti orafi. Nel 1588 diede anche una prova della propria erudizione letteraria con delle lezioni su Dante tenute presso l'Accademia fiorentina.

Intanto, già nel 1585, Galileo abbandonò Pisa senza aver conseguito la laurea e, a Firenze, si dedicò all'insegnamento privato, per sostentarsi negli studi matematici. Grazie alla stima e alla fama procurata da questa sua cultura matematica, nel 1589 ottenne la cattedra di Matematica all'Università di Pisa, un lavoro che gli assicurava l'indipendenza economica dal padre. Nei tre anni che trascorse a Pisa, Galileo si dedicò allo studio del moto, scoprendo la legge di caduta dei gravi. Da queste ricerche derivò un trattato latino *De motu* (1592), nel quale Galileo prendeva le distanze dalle tesi aristoteliche, accentuando l'impiego di strumenti matematici nell'analisi del problema.

Alla fine del 1592, Galileo si trasferì a Padova, dove occupò la cattedra di matematica e rimase per 18 anni, che sono i più sereni e fruttuosi della sua vita. Qui continuò i suoi studi di meccanica ed astronomia: alcune lettere, tra cui una a Keplero del 1597, testimoniano ch'egli aderiva alla teoria copernicana; in tre lezioni del 1604 sostenne, anzi, la validità di alcune prove di questa. In questi anni si dedicò anche a ricerche di interesse pratico: in una piccola officina, presso la propria casa di Padova, costruì numerosi strumenti matematici (tra i quali un regolo calcolatore, descritto nell'opuscolo *Le operazioni del compasso geometrico militare*, del 1606), inventò un termometro e fabbricò calamite, con uno studio accurato delle armature che ne accrescono la potenza.

Ma la realizzazione più importante fu quella del cannocchiale che in realtà non fu invenzione di Galilei, in quanto artigiani olandesi e italiani ne avevano già approntati diversi tipi; Galilei fu tuttavia il primo che si occupò sistematicamente dello strumento, perfezionandolo, aumentandone il potere d'ingrandimento e soprattutto inaugurando l'epoca delle grandi scoperte astronomiche, di cui lo stesso Galilei diede annuncio nel *Sidereus Nuncius* (*Ragguaglio astronomico*) del 1610. I quattro maggiori satelliti di Giove e le montagne ed i crateri della Luna, erano fenomeni fino ad allora sconosciuti che destavano meraviglia ed ammirazione tanto nel mondo accademico (Keplero riconobbe e confermò l'importanza delle scoperte di Galilei), quanto in certo ambiente politico (Cosimo de' Medici lo nominò "matematico primario dello studio di Pisa e filosofo del granduca" senza obbligo di lezioni né di residenza), ma anche ostruzionismo ed astio da parte delle gerarchie ecclesiastiche (in particolare del cardinale Bellarmino) e degli aristotelici.

Negli anni seguenti, Galileo difese l'attendibilità delle scoperte effettuate col telescopio (cui si aggiunsero le osservazioni sulle macchie solari, documentate nell'*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*, pubblicata nel 1613). Queste scoperte avevano a suo giudizio il significato di una smentita della cosmologia tradizionale e rappresentavano la conferma dell'ipotesi di Copernico.

Contro Galileo si schierarono i professori peripatetici e, in campo ecclesiastico, i domenicani. Altri ordini religiosi e singoli uomini di chiesa apprezzavano le ricerche innovative. I gesuiti mostrarono dapprima interesse per le scoperte di Galileo, che egli stesso illustrò ai padri del Collegio romano, durante la visita a Roma nel 1611, ma in seguito negarono validità fisica al Copernicanesimo.

Nel 1616 il Sant'Uffizio mise all'indice la cosmologia copernicana e convocò Galilei a Roma per giustificare le sue opinioni. Qui il suo tentativo di difendere le concezioni astronomiche copernicane (e le proprie) in quanto inoffensive nei confronti della Bibbia, venne respinto e lo scienziato venne intimato a non professarle più. Galileo continuò tuttavia ad approfondire ed ampliare i suoi studi e,

nel 1623, compose in volgare il *Saggiatore*, nel quale polemizzava con il padre gesuita Orazio Grassi riguardo alla natura delle comete (ne erano apparse tre nel 1618) e a problemi di ordine metodologico. Nello stesso anno salì al soglio pontificio Urbano VIII, un Barberini che si era dimostrato disponibile nei suoi confronti, tanto che proprio all'ex cardinale, spirito illuminato ed aperto ai discorsi scientifici, Galileo aveva dedicato il *Saggiatore*.

Incoraggiato dall'atteggiamento del nuovo papa, Galilei lavorò negli anni successivi alla composizione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, che venne pubblicato nel 1632, ma subito dopo sequestrato. Il suo autore venne citato dal papa a comparire davanti al Sant'Uffizio di Roma; il processo, iniziato nella primavera del 1633 si concluse il 22 Giugno con l'abiura al copernicanesimo da parte dell'anziano scienziato e con la condanna al carcere a vita.

Questo mutato atteggiamento delle autorità ecclesiastiche si deve, probabilmente, alle pressioni dei gesuiti. Comunque la condanna a vita venne poco dopo commutata negli arresti domiciliari, prima nel palazzo dell'Arcivescovado di Siena e poi nella sua villa di Arcetri.

Galilei si dedicò ancora alla scienza e nel 1638 pubblicò clandestinamente in Olanda un'ultima opera fondamentale: i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*. Gli venne concesso, in seguito, di ospitare in casa un giovane studioso, Vincenzo Viviani, e a partire dall'ottobre del 1641 si aggiunge il trentenne Evangelista Torricelli. Una compagnia di brevissima durata, di soli tre mesi; l'8 gennaio 1642, a 78 anni, Galileo Galilei morì.

Galileo Galilei è stato formalmente assolto dall'accusa di eresia solo nel 1992, trecentocinquanta anni dopo la sua morte.

Rapporto tra scienza e fede

Uno dei meriti di Galileo è quello di aver difeso l'autonomia reciproca della scienza e della fede. Parlando della vita di Galilei è, infatti, stato già osservato che lo scienziato ha incontrato molte ostilità per la sua aperta approvazione del sistema eliocentrico. Per spiegare le resistenze incontrate, è opportuno ricordare che l'importanza della "svolta" copernicana non si limitava all'ambito scientifico. Il sistema geocentrico tradizionale era, infatti, in sintonia con una concezione più generale dell'uomo e della sua posizione nell'universo, caratterizzata da un marcato antropocentrismo (l'uomo, creato ad immagine e somiglianza di Dio, è da Dio collocato al centro del cosmo come signore e fine della natura). Rovesciare il geocentrismo, allora, significava mettere in discussione un patrimonio amplissimo e antichissimo di credenze, che anche la recente stagione umanistica aveva contribuito a consolidare. L'ostacolo decisivo, che impedì alla chiesa di tollerare il programma galileiano, fu il contrasto che molti teologi ritennero sussistere tra la tesi eliocentrica ed alcuni passi delle Sacre Scritture (ad esempio un passo del *Libro di Giosuè*, in cui l'eroe invita il sole a fermarsi, affinché egli abbia il tempo per condurre a termine una battaglia vittoriosa), che, se interpretati letteralmente, sembravano sostenere l'idea della mobilità del sole.

Galilei affrontò il problema dei rapporti tra scienza e fede nelle cosiddette *lettere copernicane* (una inviata a don Benedetto Castelli, suo discepolo, nel 1613, due a monsignor Dini, nel 1615, e una a madama Cristina di Lorena, granduchessa di toscana, sempre nel 1615).

Secondo Galilei in campo scientifico contano l'esperienza ed il ragionamento ("*sensata esperienza*" e "*necessarie dimostrazioni*") che ci fanno conoscere le leggi imposte da Dio alla natura all'atto della creazione. Dunque, poiché sia la natura sia la Bibbia procedono dalla volontà divina, è assurdo pensare ad un contrasto tra verità di ragione ed esperienza (cioè, le verità scientifiche) e verità rivelate dalla Sacra Scrittura. Gli eventuali contrasti sono solo apparenti e dipendono da una inadeguata interpretazione della Bibbia; quest'ultima, proponendosi di insegnare agli uomini la via della salvezza, non è certo stata dettata da Dio per fornire dettagli sulla costituzione del mondo e del cielo (essa dice "*non come è fatto il cielo, ma come si va in cielo*"). Proprio per il suo valore essenzialmente morale e salvifico, la Bibbia si rivolge a tutti gli uomini, anche ai "*popoli rozzi e indisciplinati*" e deve in qualche misura tener conto della loro limitata

capacità di comprensione. Questa è la ragione per la quale la Bibbia si avvale di immagini e metafore ed anche il motivo per cui è sbagliato limitarsi ad una lettura superficiale che si fermi solo al significato letterale, ma occorre approfondire i significati del testo biblico. Si vedrà allora che non vi è nulla, nella Bibbia, che contraddica i risultati della scienza: quest'ultima può quindi svilupparsi in libertà ed autonomia senza danno per la Chiesa, anzi con grande suo vantaggio.

Il metodo sperimentale

Galileo Galilei è un personaggio al quale la cultura scientifica moderna deve certamente moltissimo, non solo per le sue scoperte ma soprattutto per aver ideato un nuovo metodo da utilizzare nell'ambito della fisica, al quale si devono i più importanti traguardi raggiunti dalla scienza. In realtà nessuna opera di Galileo è dedicata a tale argomento: lo scienziato sostanzialmente ci mostra come applicare il metodo, anche se nelle varie opere sono disseminati alcuni accenni a questioni metodologiche.

Il metodo di Galilei è il risultato della sapiente integrazione fra esperienza e matematica, o usando le sue parole, tra “*sensate esperienze*” e “*necessarie dimostrazioni*”. Esso è caratterizzato, quindi, da un momento induttivo, in cui partendo da un'attenta osservazione dei fenomeni e dei casi particolari si giunge all'elaborazione di una legge generale, e un momento deduttivo, in cui sono i ragionamenti logici, condotti sulla base della matematica, a portarci dall'intuizione alla formulazione della teoria, che verrà poi verificata sperimentalmente. Fondendo induzione e deduzione si realizza il procedimento della fisica sperimentale che prevede i seguenti passi:

1. osservazione dei fenomeni
2. misurazione matematica dei dati
3. ipotesi
4. verifica
5. legge

Occorre precisare che quando Galilei parla delle “*sensate esperienze*” non si riferisce all'immediatezza sensibile ma all'osservazione sistematica dei fenomeni studiati, mirante a coglierne gli aspetti essenziali (le “proprietà oggettive”), ossia quelli geometrici o più precisamente misurabili e dunque traducibili in figure e quantità, prescindendo dalle qualità “secondarie” o soggettive, quali colori, suoni, odori, che esistono solo in relazione ai nostri sensi. L'esperienza quotidiana è, quindi, lontana dalla scienza sia perché è ingannevole (Galilei combatté tutta la vita contro l'apparenza, si pensi alla difesa del copernicanesimo, alla nuova legge sulla caduta dei gravi, alla legge d'inerzia, ecc.), sia perché per avere un valore scientifico deve essere legittimata dall'esperimento. Infatti, la verifica a cui ci si riferisce parlando del procedimento della fisica non è altro che l'osservazione organizzata di un fenomeno che viene “costretto”, con appositi strumenti, a svolgersi in condizioni ideali per l'osservatore. Questo vuol dire anche che, nonostante i fenomeni studiati siano complessi perché soggetti a molte influenze diverse, lo scienziato deve cercare di riprodurli in modo più semplificato possibile, eliminando tutti gli effetti che disturbano la misura, il che molto spesso si può realizzare solo in un laboratorio. A volte, soprattutto per la mancanza di mezzi tecnici, la verifica può essere eseguita solo indirettamente con “esperimenti mentali”: si tratta di esperimenti non realmente avvenuti ma che hanno alla base una teoria ed un ipotetico apparato sperimentale opportunamente progettato (nella storia questa non è una novità perché l'esperimento concettuale era già stato utilizzato dagli antichi ed ebbe ampia diffusione soprattutto a partire dal medioevo). Ad esempio, non essendo ancora stata inventata la pompa da vuoto, per dimostrare che tutti i corpi cadono nel vuoto con la stessa velocità, indipendentemente dal loro peso, Galilei immaginò che due corpi dello stesso peso precipitino insieme e durante la caduta si uniscano: si avrà un unico corpo di peso doppio rispetto ai due iniziali ma con la stessa velocità, in quanto nessuno dei due corpi può variare la sua velocità solo perché è unito o separato dall'altro. Questi esperimenti ideali, che fanno parte integrante del metodo di Galilei, non escludono il ricorso all'esperienza, infatti essi servono a dimostrare dei principi che spiegano con esattezza quello che

avviene in natura.

Il metodo sperimentale si può considerare come il risultato di una sintesi fra il platonismo, il pitagorismo e l'aristotelismo. Dalla dottrina platonico-pitagorica, Galilei trae l'idea della struttura matematica del cosmo. A questo proposito è interessante ricordare un celebre brano del *Saggiatore*: “*La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non si impara a intender la lingua, e conoscer 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 a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto*”. Da questo passo è chiaro che Galilei ricerca le caratteristiche quantitative e misurabili dei fenomeni osservati perché pensa che la realtà stessa abbia una struttura geometrica e matematica, e senza conoscere la “*lingua matematica*” è impossibile decifrarla. Si noti che alla base di questa teoria c'è la convinzione di Galilei che ci sia una corrispondenza tra ciò che la scienza sostiene e la realtà vera, cioè tra il pensiero e l'essere. Occorre, inoltre, sottolineare che la matematica di Galilei è strumento della scoperta scientifica e questo è un superamento dell'idea del platonismo e del pitagorismo di una matematica sostanzialmente magico-metafisica, consistente nel far corrispondere simbolicamente numeri e figure geometriche a determinati fenomeni.

Per quanto riguarda la filosofia aristotelica, invece, quello che di essa ritroviamo nel metodo sperimentale è il ricorso all'esperienza. Proprio per questo motivo Galilei asseriva che se Aristotele fosse tornato in vita avrebbe riconosciuto lui come suo discepolo e non i pedanti aristotelici che si limitavano a leggere i testi del filosofo greco invece di osservare direttamente la natura, trovando nel maestro un comodo scudo che li proteggeva dal rischio stesso della ricerca. Questo dimostra che, sebbene Galilei si sia battuto tutta la vita contro i principi sbagliati che sosteneva l'aristotelismo, egli aveva una grande stima di Aristotele. Anche in questo caso, però, si deve precisare che l'aristotelismo pecca per una troppa aderenza alla realtà che porta all'accettazione passiva dei fenomeni, mentre per Galilei l'unica esperienza che ha valore scientifico è l'esperimento. Un ultimo aspetto della metodologia di Galilei che è importante evidenziare riguarda il rifiuto del finalismo e dell'essentialismo. Lo scienziato sosteneva, infatti, che l'uomo non può interpretare la natura con il suo metro di giudizio, cioè sulla base di ciò che può capire o che gli torna utile, quindi la scienza non deve occuparsi del “perché” dei fenomeni che avvengono, ma solo di “come” si verificano. Ad esempio nel *Saggiatore* egli ammise candidamente di non sapere “*precisamente determinare la maniera della produzione della cometa*”, ma di non ritenere questo affatto strano, in quanto fenomeni di tal fatta potevano prodursi in modo completamente al di fuori della nostra immaginazione. Questo è, se si vuole, un modo di pensare simile per certi aspetti al “non sapere” socratico ed è uno dei principali punti fermi della cultura scientifica: una legge scientifica non è per sua natura né sicura, né può venire dimostrata in alcun modo come accade invece per un teorema matematico, semplicemente essa si adatta ai dati sperimentali e nessuno sa il perché.

Inoltre Galilei non accetta la fisica che cerca di interpretare i fatti mediante le essenze o le virtù, in quanto lo scopo di ogni scienziato deve essere quello di cercare le leggi che regolano i fatti.

Insomma il fisico deve misurare i fenomeni, osservare con qualunque mezzo tutto quello che può, cercare di inserire in un contesto organico e coerente le sue osservazioni (è qui che entra in gioco la matematica), in modo da poter formulare predizioni quantitative; non fa metafisica e non specula su aspetti che non può verificare: il valore della scienza sta nelle predizioni che essa è in grado di fornire.

La distruzione della cosmologia aristotelico-tolemaica

Prima di Galilei, l'astronomia e gli eventi naturali venivano spiegati in termini aristotelici, ossia secondo un corpus di dottrine che Aristotele aveva presentato in alcuni libri fra i quali il *De caelo*.

La concezione dei cieli adottata era quella geocentrica fornita dal grandissimo astronomo alessandrino Tolomeo nell'*Almagesto* e consentiva di effettuare dei calcoli sufficientemente precisi come la predizione delle eclissi e le posizioni dei pianeti. La terra veniva posta al centro

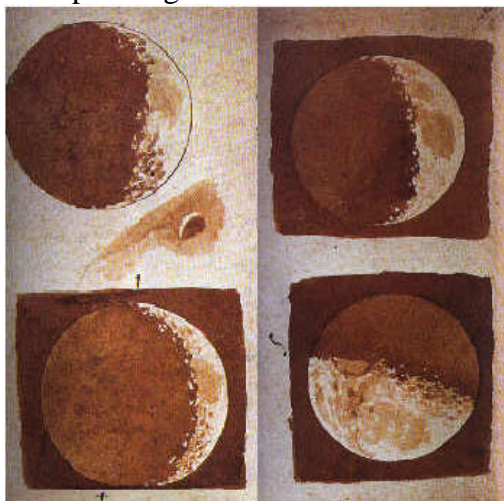
dell'universo, ed era vista però come un oggetto assai poco nobile; essa è infatti popolata da creature mortali ed è corruttibile per sua natura in contrasto con il meccanismo dei cieli immutabili ed incorruttibili e perciò degni degli dei. Attorno alla terra, venivano messi in rotazione i pianeti incastonandoli in tante sfere cristalline le quali si pensava che scorressero perpetuamente una dentro l'altra come un complesso meccanismo ad orologeria senza attrito; al di là delle sfere dei pianeti e del sole esisteva un'ultima grande sfera delle stelle fisse che ruotando forniva la spiegazione dell'alternarsi del giorno e della notte.

L'ipotesi dell'eliocentrismo, ossia del sole al centro di un sistema composto dai pianeti che vi orbitano intorno, era molto antica (risaliva alla scuola pitagorica) ed era stata portata nuovamente in auge da Copernico nel suo trattato nel 1543 soprattutto a causa di un problema (più che altro filosofico) che era presente nel modello tolemaico. Questo era costituito dalla teoria degli epicicli i quali erano un artificio matematico ideato da Tolomeo che permetteva di spiegare le osservazioni dei moti dei pianeti rispetto alla volta stellata le quali a volte non si presentavano affatto come rettilinee e contraddistinte da velocità costanti, ma sembravano comporre dei nodi e degli occhielli nel loro tragitto. La tesi fornita da Copernico evitava l'uso del meccanismo degli epicicli in modo da restituire, in nome della migliore ortodossia aristotelica la quale lo considerava privilegiato, il moto circolare uniforme ai pianeti.

Galilei abbracciò questa teoria fin dal 1597 ma un fatto determinante che lo convinse a schierarsi contro l'incorruttibilità dei cieli propugnata da Aristotele fu l'apparizione di una supernova nel 1604. Una supernova è forse l'ultima grande manifestazione di una stella morente, oggi si pensa che, alla fine del combustibile nucleare, stelle aventi una massa compresa fra certi limiti tendano a collassare su se stesse, per poi esplodere violentemente rilasciando quantità di energia enormi in periodi straordinariamente brevi. Queste esplosioni sono probabilmente gli eventi più violenti di tutto l'universo e sono a volte visibili da terra presentandosi come "stelle nuove" prima non osservabili, che tendono a scomparire nuovamente dopo un periodo di qualche mese. Il problema che si pose Galileo quarantenne fu quello di misurare la posizione di questa nova e poté appurare che essa era situata senza dubbio al di là della luna e non poteva essere affatto un fenomeno meteorologico. Il problema non era per nulla ingenuo: la constatazione dello scienziato non era solo oggetto di discussioni tecniche fra filosofi della natura, ma minava gravemente alla base tutto il pensiero naturale aristotelico. Ovviamente questo non fece che rafforzare le convinzioni copernicane già radicate nell'animo dello scienziato e scatenò prevedibilmente feroci polemiche.

Quando nell'estate del 1609, Galilei venne a conoscenza dell'esistenza dello telescopio e ne costruì un proprio esemplare, questo divenne un eccezionale strumento di indagine. Galileo non fu probabilmente il primo ad usare il cannocchiale e forse neppure puntarlo verso il cielo, ma sicuramente fu il primo a capire cosa guardare; venne inoltre aiutato da un periodo di buone condizioni meteorologiche che consentivano buone osservazioni.

La prima delle sue sensazionali scoperte riguardava la luna:



Disegni effettuati da Galileo durante le sue osservazioni della Luna.

Il nostro satellite, anche osservato ad occhio nudo, presenta delle strutture superficiali: mari, altipiani e crateri. Nella cosmologia aristotelica, per la quale tutti i corpi celesti appartenevano al regno della perfezione e pertanto non potevano avere irregolarità, l'apparenza della Luna rappresentava un problema. Le regioni scure sulla sua superficie venivano spiegate nel Medioevo come variazioni della densità lunare da un punto all'altro, le quali avrebbero dato alla Luna, anche se perfettamente sferica, l'apparenza che ha. L'avvento del telescopio fece crollare definitivamente il concetto di perfezione degli oggetti celesti. Con il suo cannocchiale, Galileo osservò non solo i "mari" della Luna, quei grandi avvallamenti che ad occhio nudo apparivano come regioni scure sulla sua superficie, ma anche molte regioni di dimensioni minori, contornate da righe scure. Egli notò che la larghezza di queste linee cambiava al variare delle fasi lunari, cioè dell'angolo di incidenza della luce del Sole. Galileo concluse quindi che esse sono ombre e che la superficie lunare ha montagne e crateri. La Luna, dunque, non è sferica né perfetta.

Un'altra scoperta molto rilevante fu quella dei satelliti di Giove che egli battezzò "Stelle medicee", in onore di Cosimo II de' Medici, Granduca di Toscana; egli le osservò per la prima volta nel gennaio del 1610 e riuscì a calcolarne con considerevole precisione il periodo orbitale. Questo assestavano ancora un duro colpo alle ipotesi aristoteliche perché uno dei punti a favore della fissità della terra era la difficoltà di pensare che un oggetto come la Luna potesse orbitarvi attorno, se essa non fosse ferma al centro dell'universo; l'osservazione di "lune" di un altro pianeta dimostrava la falsità di quest'argomentazione: se Giove ruota insieme ai propri satelliti attorno al Sole, nulla vieta di pensare che anche la Terra, con il suo satellite, possa ruotare intorno al Sole.

Secondo la cosmologia aristotelica, tutti i corpi celesti erano sferici e perfetti, ma le prime osservazioni di Saturno al telescopio costituirono una vera sorpresa. Dopo aver pubblicato il "*Sidereus Nuncius*", Galileo continuò ad osservare il cielo al cannocchiale nella speranza di fare nuove scoperte. Nel luglio del 1610, osservò Saturno quando era in opposizione. Il suo strumento non era abbastanza potente per distinguere gli anelli, ed essi gli apparirono come dei rigonfiamenti laterali del pianeta. Egli interpretò così questo aspetto: "*...Saturno non è un astro singolo, ma è composto di tre corpi, che quasi si toccano, e non cambiano né si muovono l'uno rispetto all'altro, e sono disposti in fila lungo lo zodiaco, e quello centrale è tre volte più grande degli altri due...*" Lo scienziato dette così al pianeta il nome di "Saturno tricorporeo". In seguito, egli osservò anche che i corpi laterali erano scomparsi; infatti, durante il moto di Saturno nella sua orbita, il piano degli anelli cambia direzione rispetto alla Terra: quando essi si presentavano di taglio, non potevano essere visti al cannocchiale. In seguito, altri astronomi confermarono lo strano aspetto di Saturno e le sue variazioni, ma fu solo nel 1659 che l'astronomo Christian Huygens lo spiegò con la presenza di un anello attorno al pianeta.



Saturno nei disegni di Galileo

L'aristotelismo sosteneva, inoltre, che i corpi celesti, essendo perfetti, fossero incorruttibili e non soggetti al divenire. Anche questo pregiudizio venne confutato da Galilei e precisamente tramite l'osservazione delle macchie solari: si trattava di macchie scure sulla superficie del sole che si formavano e scomparivano, dimostrando che il Sole presentava delle irregolarità sulla sua superficie e che il suo aspetto variava nel tempo.

Un'altra osservazione compiuta da Galileo riguarda le fasi di Venere. In passato si era sempre creduto che soltanto la Terra fosse un corpo opaco, illuminato dal sole e privo di luce propria. Questa scoperta, invece, induceva pensare che anche Venere ricevesse la luce del sole girandovi attorno e che questa spiegazione fosse valida anche per gli altri pianeti.

Infine il telescopio mostrò a Galileo che oltre alle stelle fisse visibili ad occhio nudo, esistevano moltissime altre stelle, facendolo giungere alla conclusione che la galassia è formata da innumerevoli stelle raggruppate nello spazio.

La principale opera in cui Galilei difende il copernicanesimo, utilizzando le prove di cui si è appena parlato, è il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Come si desume dal titolo, in quest'opera Galilei vuole confrontare i due più importanti modelli cosmologici e, anche se nel proemio al "*Discreto lettore*" egli dichiara di aderire al geocentrismo e di parlare del modello eliocentrico solo come di una ipotesi, in realtà risulta chiaro che l'autore conferma la validità scientifica dell'eliocentrismo.

Il *Dialogo* racconta una discussione ambientata a Venezia e suddivisa in quattro giornate. Vi partecipano tre personaggi, che rappresentano ben determinati orientamenti e atteggiamenti della cultura seicentesca:

- **Simplicio**, che impersona la mentalità conservatrice e tradizionalista difendendo la teoria geocentrica;
- **Salviati** (un nobile fiorentino amico di Galilei, storicamente esistito), che è il simbolo dello scienziato che pensa e opera secondo il nuovo spirito copernicano;
- **Sagredo** (un altro personaggio realmente esistito, precisamente un nobile veneziano amico dello scienziato), a cui viene affidata la parte del neutrale moderatore, che, non essendo oppresso dai pregiudizi, tende a simpatizzare con le dottrine recenti.

Nella prima giornata la discussione investe i capisaldi della cosmologia tradizionale. Viene sottoposta a critica serrata la distinzione aristotelica fra il mondo celeste e quello terrestre. Sfruttando le scoperte fatte al cannocchiale e gli studi di meccanica, Salviati oppone a questa immagine del mondo, l'idea di un universo unitario in ogni parte del quale i movimenti si svolgono secondo gli stessi principi e le stesse leggi. Nella seconda giornata si vagliano criticamente le obiezioni contro l'idea copernicana di un movimento diurno della terra intorno al proprio asse. Ad esempio, contro chi sostiene che se davvero la terra ruotasse su se stessa, essa dovrebbe sollevare un vento tale da trasportare tutti gli oggetti, le nuvole dovrebbero apparirci continuamente in movimento da est ad ovest (se la terra si muove da ovest ad est), oppure il volo degli uccelli non potrebbe seguire il velocissimo spostamento del nostro pianeta, Galileo, attraverso Salviati, risponde che l'aria partecipa dello stesso movimento della terra e trasporta con se le nuvole e gli uccelli, rimanendo ferma in rapporto al nostro pianeta. Un altro argomento degli aristotelici sostiene che se la terra si muovesse da ovest ad est, i gravi dovrebbero cadere obliquamente più ad ovest del punto di partenza, perché durante la caduta la terra si è spostata verso est. Anche in questo caso Galilei controbatte dicendo che il grave partecipa del moto della terra, quindi muovendosi insieme ad essa deve cadere perpendicolarmente (oggi sappiamo che la traiettoria di caduta del grave risulta deviata verso est perché bisogna tener conto che la terra non è esattamente un sistema inerziale). In ogni caso tutte le contro-argomentazioni di Galilei si basano sul ***principio di relatività galileiana***, che attualmente viene enunciato nel seguente modo: le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento che si muovono fra loro di moto rettilineo uniforme (cioè nei sistemi di riferimento inerziali). In realtà Galilei non ha mai formulato il principio in questi termini. Egli sosteneva soltanto che, sulla base delle esperienze meccaniche compiute all'interno di un sistema chiuso, cioè senza possibilità di riferirsi a qualcosa di esterno, non si può stabilire se esso sia in quiete o in moto rettilineo uniforme (questo è chiaro, ad esempio, nella famosa esperienza della nave). Questo vuol dire che trovandoci sulla Terra non possiamo stabilire se il corso del Sole che noi osserviamo dipende dal fatto che il Sole ruota attorno alla Terra o dal movimento di rotazione della Terra intorno al Sole. Poiché "*tanto è far muovere la Terra sola quanto tutto 'l resto del mondo*", resta da chiedersi quale dei due sistemi è più sensato (si noti che la completa relatività del moto può servire solo per smentire chi dice che il moto della terra non sia possibile, ma non può dimostrare che la terra è in moto ed il sole è fermo). Un argomento per preferire la cosmologia copernicana a quella tolemaica è la sua maggiore semplicità. In effetti, gli stessi fenomeni (i movimenti apparenti degli astri in 24 ore) possono essere spiegati o con l'ipotesi tolemaica o con

quella copernicana, ma mentre con la prima occorre ammettere molte sfere di enormi dimensioni che ruotano attorno alla Terra, con la seconda basta ipotizzare che sia la Terra, un corpo relativamente piccolo rispetto all'universo, a ruotare su se stessa.

Ritornando al *Dialogo*, nella terza giornata la discussione verte sul moto di traslazione annuo della Terra intorno al Sole e nella quarta giornata viene dibattuta una teoria (erronea) delle maree, secondo la quale il flusso e il reflusso del mare sarebbero spiegabili come conseguenza del sommarsi di moti di rivoluzione e rotazione della Terra.

Il problema del moto

Galilei si occupò del problema del moto soprattutto nei *Discorsi intorno a due nuove scienze*. Come il *Dialogo* anche i *Discorsi* hanno forma di dialogo con gli stessi personaggi e sono organizzati in quattro giornate. Nella prima e nella seconda giornata si discute su un problema significativo non solo dal punto di vista teorico ma anche da quello dell'applicazione tecnica: la "resistenza dei materiali". Nella terza giornata l'attenzione si concentra sulle leggi del moto (rettilineo uniforme, uniformemente accelerato e naturalmente accelerato). Nella quarta giornata viene studiato il ***moto dei proiettili***, altro argomento di grande interesse pratico essendo legato ai lanci di artiglieria. Prima di Galileo, si credeva che un corpo lanciato in direzione orizzontale, per esempio un proiettile sparato da un cannone, si muovesse in direzione orizzontale fino a quando non perdeva il suo "impeto"; dopo cadeva verso terra, seguendo una traiettoria curvilinea che però non era ancora conosciuta. Galileo si accorse, durante lo studio del moto dei proiettili, che essi non sono soggetti soltanto alla forza che li spinge in direzione orizzontale, bensì anche alla forza di gravità, che li attira verso il basso. La prima componente agisce come una forza inerziale, nel senso che il corpo ad essa soggetto percorre una distanza in orizzontale che è proporzionale al tempo impiegato per percorrerla. La seconda invece provoca un moto uniformemente accelerato, cioè la distanza percorsa in verticale è proporzionale al quadrato del tempo impiegato a percorrerla. Galileo dimostrò che la combinazione dei due moti orizzontale e verticale risulta nel moto del proiettile lungo un arco di parabola.

La caduta dei gravi

Uno degli oggetti di indagine di Galileo riguardò il moto dei corpi materiali (detti "gravi"), in particolare quello dei corpi in caduta libera. Secondo la fisica aristotelica, un corpo in caduta si muove di una velocità costante, la quale dipende direttamente dal peso del corpo ed inversamente dalla viscosità del mezzo in cui esso si muove.

Galileo cominciò ad investigare criticamente questa ipotesi. Lo scienziato pensava dapprima che i corpi cadessero con una velocità uniforme caratteristica, che dipendeva non dal loro peso, né dalla resistenza del mezzo, bensì da una proprietà intrinseca detta gravità (questa è la teoria esposta nell'opera giovanile *De Motu*). Successivamente, dopo aver realizzato molti esperimenti, si rese conto che un grave per natura tende a muoversi verso il centro della Terra, con moto uniformemente accelerato, ed accelerato sempre egualmente, indipendentemente dal materiale di cui è composto, dal suo peso o dalla sua forma. Questo, però, si verifica quando vengono rimossi tutti "gl'impedimenti accidentarii ed esterni", tra i quali ce n'è uno che è difficile eliminare, ossia la resistenza del mezzo in cui si muove il corpo. Poiché tale resistenza cresce all'aumentare della velocità di caduta e quest'ultima accelera continuamente, alla fine la velocità raggiungerà un valore limite tale che la spinta verso il basso e la resistenza del mezzo si equilibrano. A questo punto il corpo si muove di moto rettilineo uniforme e mantiene questo moto sempre.

La verifica sperimentale di questa legge risultò molto complessa perché i mezzi tecnici a disposizione di Galileo non gli permettevano di misurare la velocità istantanea di un corpo, cioè il valore di v/t . Partendo dall'ipotesi che nel corso della caduta un corpo aumenti la propria velocità in modo direttamente proporzionale agli istanti di tempo, lo scienziato, allora, dedusse matematicamente la legge

$$\Delta s = \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$$

secondo cui le distanze di caduta sono direttamente proporzionali al quadrato dei corrispondenti intervalli di tempo. Ancora una volta, la verifica diretta di questa legge sperimentale gli era impossibile, soprattutto perché non aveva alcun modo per misurare con precisione piccoli intervalli di tempo. Allora, visto che il moto di caduta libera è troppo veloce per essere studiato, Galileo pensò di studiare la discesa di una sfera lungo un piano inclinato, formato da una scanalatura ben levigata e foderata di carta pecora, su cui rotolava una palla di bronzo. Nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali* Galileo racconta di aver verificato sperimentalmente la proporzionalità diretta tra Δs e $(\Delta t)^2$ con diverse inclinazioni del piano inclinato (naturalmente, la costante di proporzionalità dipende dall'inclinazione della scanalatura). Da ciò egli, con un processo di induzione, dichiara che anche il moto di caduta libera di un corpo segue la stessa legge.

Occorre far notare che, in questo modo, oltre a trovare la legge del moto uniformemente accelerato, Galilei anticipa il secondo principio della dinamica, per cui le forze applicate ai corpi non causano delle velocità, ma delle accelerazioni.

Avendo spiegato qual è la legge con cui si muovono i gravi, rimane il problema di chiarire come avviene il moto. Secondo la fisica aristotelica, la velocità è proporzionale alla potenza motrice quindi se quest'ultima è finita deve essere finita anche la velocità. Questo vuol dire che quando un grave cade, acquista subito una velocità finita. Galilei, invece, sostiene che a partire dalla quiete si ha un accrescimento infinitamente continuo della velocità, cioè la variazione della velocità avviene per un numero infinito di gradi (e non finito come si pensava tradizionalmente) passando per tutti i gradi intermedi *“perché, partendosi dallo stato di quiete... non ci è ragione nessuna per la quale e' debba entrare in un tal determinato grado di velocità, prima di entrare nel minore, ed in un altro ancor minore prima che in quello”*. Per descrivere meglio il moto Galilei introduce il concetto di momento che nel *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua* egli definisce come *“quella virtù, quella forza, quella efficacia, con la quale il motor muove e 'l mobile resiste; la quale virtù dipende non solo dalla semplice gravità, ma dalla velocità del moto, dalle diverse inclinazioni degli spazii sopra i quali si fa il moto, perché più fa impeto un grave discendente in uno spazio molto declive che in un meno”*. In questo modo il moto può essere considerato come la somma di infiniti momenti, ciascuno dei quali è *“o interno e naturale di se medesimo (che è quello della propria gravità assoluta...), o estrinseco e violento, quale è quello della forza movente. Tali momenti nel tempo della mossa del grave si vanno accumulando di instante in instante con uguale additamento e conservando in esso, nel modo appunto che si va accrescendo la velocità di un grave cadente”*. Va notato come si comincia a legare la velocità al momento e non più alla gravità in sé; quello che ancora manca è una chiara distinzione tra gravità e momento.

Il principio d'inerzia

Nella teoria di Aristotele l'assunto fondamentale che spiegava i movimenti dei corpi sosteneva che lo stato di moto di un corpo è determinato dalla presenza di una forza che vi agisce; esaurito l'effetto di tale “forza” si perviene in breve tempo alla quiete, la quale compete alla natura dell'oggetto stesso.

Galilei intuì, invece, già nel 1593 che non è necessaria una forza per tenere in moto un corpo, e dopo 30 anni di osservazioni ed esperienze giunse alla conclusione che un corpo tende a conservare indefinitamente il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, finché non interviene una forza esterna modificare tale stato (questo enunciato è noto come principio d'inerzia o primo principio della dinamica). Per giungere a questa legge, che non può essere verificata direttamente, Galilei considerò (nella seconda giornata del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*) il moto di un corpo sopra un piano orizzontale come caso limite del moto sopra un piano inclinato: la velocità di un corpo che scende lungo un piano inclinato va aumentando, quella di un corpo che risale su di esso va diminuendo; di conseguenza su un piano *“che non fusse né acclive né declive”* (cioè che

fosse orizzontale) un corpo al quale *“fusse dato impeto verso qualche parte...seguirebbe il muoversi verso quella parte”*. Inoltre il suo moto non sarà né accelerato né ritardato, cioè esso si muoverà sempre con velocità uniforme: *“il mobile”* scrive Galileo *“durasse a muoversi...tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie , né erta né china ; ...se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimenti senza termine, cioè perpetuo”*. Ma ciò, dice altrove Galileo, *“deve interdarsi in assenza di tutti gli impedimenti esterni ed accidentarii”* (dovuti alla forma del corpo, che perciò egli suppone perfettamente sferico, alla ruvidezza del piano, alla resistenza dell'aria); *“dovendo supporre che il piano sia in un certo modo incorporeo”* (cioè un piano ideale del tutto privo di attriti) e che i corpi in movimento siano *“immuni da ogni resistenza esterna: il che essendo forse impossibile trovare nella materia, non si meravigli taluno, che faccia prove del genere, se rimanga deluso dall'esperienza”*. Si potrebbe pensare che il piano di cui parla Galilei è il piano astratto della geometria euclidea e non un piano concreto, ma lo scienziato più volte sottolinea che *“nelle nostre pratiche gli strumenti nostri e le distanze le quali vengono da noi adoperate, son così piccole in comparazione della nostra gran lontananza dal centro del globo terrestre, che ben possiamo prendere un minuto di un grado del cerchio massimo com se fusse una linea retta, e due perpendicolari che da i suoi estremi pendessero, come se fussero parallele”*. Questo vuol dire che se la superficie del nostro globo fosse ben levigata, essa permetterebbe un moto inerziale (poiché la superficie della Terra non è né declive né acclive ed è *“in tutte le sue parti egualmente distante dal centro”*).

Comunque, anche se Galilei sembra aver intuito il principio d'inerzia, in nessuna delle sue opere è presente una formulazione generale e precisa di tale principio. Questo ha portato alcuni critici, come Koyré, a pensare che Galilei non sia realmente pervenuto ad esso. Altri difendono lo scienziato, ad esempio Geymonat sostiene che Galileo non ha enunciato il principio della sua generalità perché non ne ha mai avuto bisogno nei problemi particolari da lui presi in esame, ma lo ha sicuramente compreso perché lo ha applicato benissimo in tutte le argomentazioni in cui era necessario. A sostegno di questa tesi si può notare che due allievi e collaboratori di Galilei, Cavalieri e Torricelli, sembrano avere raggiunto la nozione del principio d'inerzia (entrambi sostengono che un proiettile posto nel punto A e spinto in una qualunque direzione AB, si muoverebbe di moto rettilineo uniforme lungo AB, se non ci fosse la gravità a spingerlo verso il centro della terra) ma nessuno dei due presenta in maniera chiara questa legge e ciò può far pensare che non credevano di dire qualcosa di nuovo rispetto a Galilei.

Gravità

Nelle opere di Galilei la gravità è intesa come qualcosa che è interno ai corpi e che non si può eliminare quando si parla di fisica dei corpi reali (è come se parlassimo del campo elettrico a prescindere dalla carica), infatti lo scienziato non riesce farne astrazione, mentre è capace di immaginare piani privi di attriti o la caduta di oggetti nel vuoto.

In un brano del *Saggiatore*, però, la gravità non compare nella lista delle proprietà del corpo né di quelle essenziali né di quelle inessenziali. Inoltre nel *Dialogo* si legge:

SALVIATI: ... dico che quello che fa muovere la Terra è una cosa simile a quella per la quale si muove Marte, Giove, e che è credo che si muova anche la sfera stellata; e se egli mi assicurerà chi sia il movente di uno di questi mobili, io mi obbligo a saper dire chi fa muovere la Terra. Ma più, io voglio far l'istesso s'ei mi sa insegnare chi muova le parti della Terra in giù.

SIMPLICIO: La causa di quest'effetto è notissima, e ciaschedun sa che è la gravità.

SALVIATI: Voi errate, signor Semplicio ; voi dovrete dire che ciaschedun sa che ella si chiama gravità. Ma io non vi domando del nome, ma dell'essenza della cosa... ”.

Questo è interpretato da Koyré sostenendo che in realtà “gravità” è un'espressione tratta dal linguaggio comune, non un termine tecnico o una proprietà dei corpi. Secondo altri critici Galilei vuole semplicemente dire che per sapere cos'è una cosa non basta darle un nome e poiché egli non ha elementi per entrare a discutere di gravità, preferisce sospendere il giudizio, per continuare ad attenersi a fatti inscrivibili all'interno di una teoria enunciabile in forma matematica.

Inoltre nel trattato *Le Meccaniche* Galilei definisce la gravità come “*quella propensione di muoversi naturalmente al basso, la quale, nei corpi solidi, si ritrova cagionata dalla maggiore o minore copia di materia, dalla quale vengono costituiti*”, quindi si può concludere che nella fisica galileiana la gravità è intesa soprattutto come unica fonte naturale del moto.

A proposito della gravità, a Galileo si attribuisce il merito di aver intuito l'equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale, infatti eseguendo esperimenti sul piano inclinato si rese conto che la massa che si oppone al moto (inerziale) e quella che produce il moto (gravitazionale) sono equivalenti.

Conclusioni

In conclusione, nonostante nella mente popolare Galileo sia ricordato principalmente come un astronomo, egli deve essere considerato il padre della scienza, ed in particolare della fisica, anche per il nuovo metodo introdotto e per le scoperte nel campo della meccanica, perché proprio con queste ultime lo scienziato pisano aprì all'umanità la strada per riuscire a capire com'è fatto il mondo in cui viviamo. Comunque ciò che colpisce di Galileo è la straordinaria modernità di quello che asserisce: egli merita forse di essere ricordato non tanto per aver scoperto questa o quella legge fisica (cosa che peraltro non mancò di fare), ma quanto più nell'aver ideato il contesto culturale nel quale le stesse leggi andavano inserite.

Bibliografia

- Prof. G. D. Maccarrone, Appunti dei corsi di “Epistemologia” e “Storia della fisica”, Anno Accademico 2002/2003;
- G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, Saggiatore, Discorsi intorno a due nuove scienze, Le Meccaniche*;
- A. Koyrè, *Studi Galileiani*, Einaudi, Torino 1976;
- Nicola Abbagnano - Giovanni Fornero, *Filosofi e filosofie nella storia*, volume secondo, Paravia;
- Ugo Amaldi, *La fisica per i licei scientifici*, volume primo, Zanichelli;
- A. Cardioli, C. Di Alesio, Edoardo Esposito, Lorenzo Vincenti, *Biblioteca*, volume terzo, edizioni Archimede;
- Articoli su vari siti internet.