

## Galilei fisico

**Liceo Quadri – 23 aprile 2009**

### Introduzione

Tutti sappiamo che Galilei fu il primo a dimostrare che la caduta di corpi di massa diversa si svolge in tempi uguali. Eppure, consideriamo il testo di un problema di ammissione alla classe di Scienze della Scuola Normale Superiore di Pisa per l'anno accademico 1969–70:

*Si considerino due sfere di uguali dimensioni, una di ferro, l'altra di legno. Queste due sfere vengono lasciate cadere verticalmente nell'aria. Si dimostri che:*

*(a) le due sfere non possono cadere con la stessa legge oraria;*

*(b) durante la caduta, ad ogni istante, la velocità della sfera di ferro è maggiore della velocità della sfera di legno;*

*(c) la sfera di ferro arriva al suolo prima di quella di legno.*

Il testo del problema ha un evidente riferimento all'esperimento che Galilei avrebbe compiuto facendo cadere dalla torre di Pisa due sfere di peso diverso. Come possiamo conciliare la convinzione di Galilei con quanto osserviamo comunemente, ossia che un foglio di carta impiega più tempo di una gomma da cancellare per raggiungere il pavimento?

Lo studio della caduta dei gravi è un argomento di fisica; in questa relazione mi propongo di mettere in evidenza il contributo dato da Galilei alle scienze fisiche, con particolare attenzione proprio al problema della caduta libera dei gravi. Vedremo che la ricerca galileiana contribuì a creare le basi della fisica non solo e non tanto per gli argomenti trattati da Galilei e per le leggi fisiche da lui enunciate, ma soprattutto per l'impostazione data da Galilei alla sua ricerca. Egli fu uno dei primi scienziati nel senso moderno del termine: con la sua concezione del mondo, il suo modo di ragionare e di usare la matematica e la sua convinzione della necessità di usare controlli sperimentali egli creò il metodo di lavoro della scienza moderna. Questi aspetti della sua opera sono quindi tanto importanti quanto gli effettivi risultati della sua ricerca.

Il drammaturgo tedesco Bertold Brecht nell'opera teatrale *Vita di Galilei*, fa dire al papa Urbano VIII che Galilei "è il più grande fisico dei nostri tempi". Con queste parole Brecht esprime, più che il pensiero del pontefice Barberini, il giudizio di noi moderni sull'opera dello scienziato pisano. Ma perché Galilei è il più grande fisico del suo tempo? Ecco perché: la sua opera si articolò in una vasta gamma di ricerche dirette ad indagare tutti i campi della fisica del suo tempo. Di certo, l'ambito in cui Galilei raggiunse i più importanti risultati fu senza dubbio la meccanica: i suoi risultati riguardano la caduta libera dei gravi, la composizione dei movimenti e il moto dei proiettili (determinandone l'angolo di massima gittata), l'isocronismo delle oscillazioni del pendolo, l'enunciazione del principio delle velocità virtuali, da D'Alembert rinominato principio dei lavori virtuali, che permette la determinazione delle condizioni di equilibrio di ogni sistema meccanico, l'enunciazione del principio di inerzia e del principio di relatività. Per mettere in luce l'importanza scientifica di quest'ultimo principio basterà ricordare che la teoria della relatività ristretta di Einstein si basa su una generalizzazione del principio di relatività galileiano.

Tuttavia non sempre Galilei si mostrò, come in questi casi, un geniale precursore di risultati avvalorati dagli sviluppi successivi della teoria fisica; vanno menzionati come suoi insuccessi i tentativi di spiegazione del fenomeno delle comete e del fenomeno delle maree.

L'importanza storica delle ricerche di Galilei intorno alla meccanica dipende dal fatto che esse si innestarono direttamente e con grande efficacia nella lotta degli scienziati del '600 a favore della teoria Copernicana. Come illustrerò in seguito, tali ricerche costituirono la base sicura per confutare le obiezioni sollevate fin dall'antichità contro il moto della Terra. In relazione a tale questione, l'opera maggiore in cui Galilei espone le sue ricerche è *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze Attenenti alla Meccanica e i Movimenti Locali* (1638) che chiamerò per brevità *Le due nuove scienze*. Questo trattato segnò la fine non solo della teoria medievale della meccanica, ma anche dell'intera cosmologia aristotelica che su di essa era fondata.

Se il principale campo delle indagini fisiche di Galilei fu la meccanica, esso non fu certo l'unico. Altre ricerche vennero da lui dirette all'ottica, alla termologia, all'idrostatica, alla costituzione microscopica della materia. Nella sua officina fu radicalmente perfezionato il cannocchiale, furono studiati i galleggianti, fu inventato il primo termoscopio, furono eseguite esatte osservazioni sulla resistenza delle macchine e formulata una corretta teoria al riguardo. Ricadono entro l'ambito della fisica anche il tentativo di misura della velocità della luce.

Infine, rivestono una importanza fondamentale le accurate osservazioni astronomiche eseguite da Galilei sui corpi del sistema solare ed esposte per la maggior parte nel *Sidereus Nuncius* del 1610, oltre che, ovviamente, le considerazioni cosmologiche che da esse Galilei dedusse ed espose nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* del 1632.

## **Il problema della caduta dei gravi – 1: la fisica Aristotelica**

La meccanica è la parte della fisica che studia il moto della materia soggetta a forze. Per comprendere la natura della riflessione di Galilei intorno alla meccanica e apprezzarne il significato dobbiamo anzitutto vedere quale fosse il sistema di pensiero scientifico dominante nel suo tempo, che fu poi sostituito dalle concezioni galileiane. La fisica medievale, studiata da Galilei all'Università di Pisa, faceva una netta distinzione tra corpi terrestri e corpi celesti. Secondo quella teoria, tutta la materia terrestre, cioè quella fisicamente accessibile all'uomo, era formata da una miscela di quattro elementi: Terra, Acqua, Aria e Fuoco. Vale la pena rammentare che nessuno di questi è un elemento in senso moderno: sono tutte miscugli o composti. Comunque gli elementi di cui parlavano i filosofi dell'antichità non erano identici alle sostanze reali da cui prendevano nome: per esempio, l'acqua comune era considerata una miscela di tutti e quattro gli elementi, in cui prevaleva l'elemento Acqua. Ognuno dei quattro elementi aveva un suo *luogo naturale* nella regione terrestre: il più elevato spettava al Fuoco, al di sotto veniva l'Aria, poi l'Acqua e infine, nel luogo più basso, la Terra. Ogni elemento tendeva al suo luogo naturale: il Fuoco, spostato al di sotto del proprio luogo, risaliva verso di esso attraversando l'Aria, l'Aria doveva salire attraverso l'Acqua, mentre la Terra tendeva a cadere attraverso l'Acqua e l'Aria. Il moto di un corpo qualsiasi dipendeva dalle proporzioni in cui i quattro elementi entravano nella sua composizione e dalla sua posizione rispetto ai luoghi naturali degli elementi

stessi. Per esempio, nell'acqua in ebollizione, all'Acqua si aggiungeva l'elemento Fuoco che, avendo un luogo naturale più elevato, costringeva la miscela a salire, sotto forma di vapore. Invece una pietra, essendo formata in prevalenza dall'elemento Terra, cadeva appena lasciata andare, attraversando Fuoco, Aria e Acqua fino a fermarsi al suolo, suo luogo naturale. Questa teoria dei «luoghi naturali» si accorda abbastanza bene, ancor oggi, con l'esperienza quotidiana e col senso comune.

Gli studiosi medievali, seguendo Aristotele, credevano che le stelle, i pianeti e gli altri corpi celesti fossero diversi, per composizione e comportamento, dagli oggetti posti sulla Terra o nelle sue vicinanze: i corpi celesti non contenevano alcuno dei quattro elementi che formavano la materia ordinaria, ma erano formati solo da un quinto elemento, la *Quintessenza*. Gli studiosi greci usavano il termine «etere». Ma che cos'è l'etere? *"Dal Chaos furono generati Érebo [il regno dei morti] e la nera Notte; e dalla Notte poi nacquero Etere e il Giorno ed essa li concepì e fece nascere per essersi unita d'amore con Érebo"*

Questa è la tradizione riportata da Esiodo nella Teogonia a proposito della nascita di Etere. Nei poemi omerici, invece, l'etere non era personificata e stava a rappresentare il cielo al di sopra dell'aria. Aristotele dimostra la necessità dell'etere, inteso come costituente della materia che riempie i cieli, in perpetuo moto circolare. Esso non possiede né pesantezza, né leggerezza, né generazione, corruzione, accrescimento o diminuzione; per i corpi formati da questo elemento il moto naturale non era né l'ascesa né la caduta, ma un moto di perenne rivoluzione su orbite circolari attorno al centro dell'Universo, che coincideva col centro della Terra. Pur muovendosi, questi corpi restavano sempre nel loro luogo naturale, e ciò li rendeva del tutto diversi dai corpi terrestri, che presentavano un moto spontaneo solo quando spostati dal loro luogo naturale tendevano a ritornarvi.

Questa teoria della materia e del moto, accettata da molti studiosi ai tempi di Galilei, aveva avuto origine quasi 2000 anni prima, nel IV secolo a.C., ed è esposta con chiarezza nelle opere del filosofo greco Aristotele. Essa riusciva a spiegare molti fenomeni nell'ambito dell'esperienza quotidiana; inoltre, essendo fondata sui concetti di ordine, classificazione, luogo e scopo, era particolarmente accettabile in società come quelle in cui vivevano Galilei e Aristotele, dove rango e ordine erano i fattori dominanti. Inoltre, la concezione della materia e del moto faceva parte di una cosmologia nella quale Aristotele cercò di inquadrare argomenti che per noi oggi appartengono a campi di studio separati, come scienza, poesia, politica, etica e teologia. L'opera di Aristotele rappresenta quasi un'enciclopedia del pensiero greco. Purtroppo, le teorie fisiche di Aristotele avevano dei gravi limiti, anche se questo non toglie nulla al valore dei risultati da lui raggiunti in altri campi. Egli considerava la caduta di un oggetto pesante verso il centro della Terra come un esempio di moto naturale ed era convinto, per quanto ci risulta, che ogni oggetto lasciato a se stesso raggiunga in breve tempo una velocità costante di caduta e la mantenga fino alla fine del percorso. Quali fattori determinano la velocità terminale di un oggetto che cade? È facile osservare che una pietra cade più rapidamente di una foglia: Aristotele ne dedusse che il peso di un oggetto contribuisce a determinare la velocità di caduta. Questa conclusione confermava la sua teoria, secondo la quale la causa del peso era la presenza dell'elemento Terra, che tendeva naturalmente verso il centro della Terra. Perciò un oggetto più pesante, contenendo una maggior quantità di questo elemento, avrebbe avuto

una tendenza più forte a portarsi nel suo luogo naturale e quindi avrebbe raggiunto una maggior velocità nella caduta.

Avendo constatato che uno stesso oggetto cade più lentamente nell'acqua che nell'aria, Aristotele pensò che la velocità dovesse dipendere anche dalla resistenza del mezzo e decise che l'influenza di altri fattori, come il colore o la temperatura dell'oggetto, fosse trascurabile. Ne concluse che la velocità di caduta doveva essere proporzionale al peso dell'oggetto e inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo, così da poter essere calcolata caso per caso, dividendo il peso per la resistenza.

Aristotele esaminò anche il moto «violento» cioè il moto di un oggetto che non si sta spostando liberamente verso il suo «luogo naturale». Secondo la sua teoria, un tale moto doveva essere causato da una *forza*: se la forza aumentava doveva aumentare la velocità, se la forza cessava di agire, il moto doveva cessare. Questa spiegazione è in accordo con l'esperienza comune, come nel caso in cui spingiamo una sedia o un tavolo sul pavimento; ma non funziona più così bene se viene applicata a oggetti lanciati attraverso l'aria, perché questi continuano a muoversi anche dopo che la forza ha cessato di agire. Aristotele avanzò l'ipotesi che in questo caso fosse l'aria stessa a esercitare una forza mantenendo in moto l'oggetto che l'attraversa. Nei secoli successivi altri studiosi proposero modifiche per migliorare la teoria del moto di Aristotele che comunque continuò a formare la base degli studi scientifici nelle università europee del XV e XVI secolo poiché spiegava in termini generali, anche se qualitativi, la maggior parte dei fenomeni che si verificano nell'esperienza comune.

Due altri aspetti del pensiero aristotelico rendevano difficile una radicale revisione della teoria del moto: in primo luogo la convinzione che il linguaggio matematico fosse poco adatto a descrivere i fenomeni terrestri e, in secondo luogo, la convinzione che la teoria dovesse basarsi su osservazioni qualitative e dirette. Questo tipo di osservazioni aveva permesso ad Aristotele di raggiungere ottimi risultati negli studi biologici. Nel campo della fisica furono invece possibili dei reali progressi, come si vide in seguito, solo quando si cominciò ad apprezzare l'importanza dell'analisi matematica e di esperimenti accurati.

Molti furono gli studiosi che, nel '400 e '500, parteciparono alla creazione di questo nuovo metodo scientifico, ma Galilei fu quello che ebbe, di gran lunga, maggiore importanza e successo. Egli mostrò in che modo potesse essere descritto in termini matematici il movimento di alcuni oggetti semplici e comuni, come pietre che cadono e sfere che rotolano lungo un piano inclinato. Con questo lavoro, egli non solo aprì la via ad altri, che descrissero e studiarono i moti di oggetti di ogni tipo, dai sassi ai pianeti, ma iniziò una rivoluzione intellettuale che portò alla formulazione della scienza moderna.

## **Il problema della caduta dei gravi – 2: confutazione di Aristotele**

I primi scritti di Galilei sulla meccanica restavano nell'ambito delle tradizionali teorie fisiche medievali, sebbene egli cominciasse a rendersi conto della loro insufficienza. Negli anni della maturità si interessò soprattutto di astronomia. Quando però il Tribunale del Sant'Uffizio condannò il più importante libro che egli aveva scritto su questo argomento, il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632) e gli proibì di insegnare l'astronomia copernicana, Galilei si dedicò nuovamente allo studio della meccanica. Frutto di questo lavoro fu il libro *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze*

*Attenenti alla Meccanica e i Movimenti Locali* (1638). Galilei, quando scrisse ad Arcetri, presso Firenze, dove era stato confinato dalla condanna della Chiesa, *Le due nuove scienze*, la sua ultima opera, era vecchio, malato e quasi cieco, eppure il suo stile è vivace e piacevole come in tutti i suoi scritti. Egli usò ancora la forma del dialogo, descrivendo una vivace conversazione fra tre interlocutori: *Simplicio*, che sostiene con competenza il punto di vista aristotelico, *Salviati*, che presenta le nuove concezioni di Galilei e *Sagredo*, l'uomo che non ha ancora preso posizione, ma è ricco di buona volontà, aperto di mente e ansioso di imparare. I tre personaggi, oltre a discutere di molti altri argomenti, leggono e commentano un breve trattato latino, *De motu locali*. Nel dialogo non si fa il nome dell'autore del trattato, che viene detto «il nostro Accademico» ed è Galilei stesso. Leggiamo insieme il brano in cui i tre discutono il problema della caduta libera:

**Salviati:** [...] io grandemente dubito che Aristotele non sperimentasse mai quanto sia vero che due pietre, una più grave dell'altra dieci volte, lasciate nel medesimo istante cader da un'altezza, v. g. di cento braccia, fusser talmente differenti nelle lor velocità, che all'arrivo della maggior in terra, l'altra si trovasse non aver né anco sceso dieci braccia. [Un «braccio» è circa 50 cm].

**Simplicio:** Si vede pure dalle sue parole ch'ei mostra d'averlo sperimentato, perché ei dice: *Veggiamo il più grave*; or quel vedersi accenna l'averne fatta l'esperienza.

**Sagredo:** Ma io, Sig. Simplicio, che m'ho fatto la prova, vi assicuro che una palla d'artiglieria, che pesi cento, dugento e anco più libbre, non anticiperà di un palmo solamente l'arrivo in terra della palla d'un moschetto, che ne pesi una mezza, venendo anco dall'altezza di dugento braccia.

Ci aspetteremmo di trovare, a questo punto, il resoconto particolareggiato di un esperimento effettuato da Galilei o da uno dei suoi colleghi. Invece Galilei ricorre a un «esperimento ideale», cioè analizza quel che accadrebbe in un esperimento senza però eseguirlo effettivamente, e si serve di questo mezzo per avanzare gravi obiezioni alla teoria aristotelica del moto:

**Salviati:** Ma, senz'altre esperienze, con breve e concludente dimostrazione possiamo chiaramente provare, non esser vero che un mobile più grave si muova più velocemente d'un altro men grave, intendendo di mobili dell'istessa materia, ed in somma di quelli de i quali parla Aristotele. Però ditemi, Sig. Simplicio, se voi ammettete che di ciascheduno corpo grave cadente sia una da natura determinata velocità, sì che accrescergliela o diminuirgliela non si possa se non con usargli violenza o opporgli qualche impedimento.

**Simplicio:** Non si può dubitare che l'istesso mobile nell'istesso mezzo abbia una statuita e da natura determinata velocità, la quale non se gli si possa accrescere se non con nuovo impeto conferitogli, o diminuirgliela salvo che con qualche impedimento che lo ritardi.

**Salviati:** Quando dunque noi avessimo due mobili, le naturali velocità de i quali fossero ineguali, è manifesto che se noi congiugnessimo il più tardo col più veloce, questo dal più tardo sarebbe in parte ritardato, ed il tardo in parte velocitato dall'altro più veloce. Non concorrete voi meco in quest'opinione?

**Simplicio:** Parmi che così debba indubitabilmente seguire.

**Salviati:** Ma se questo è, ed è insieme vero che una pietra grande si muova, per esempio, con otto gradi di velocità, ed una minore con quattro, adunque, congiungendole amendue insieme, il composto di loro si muoverà con velocità minore di otto gradi: ma le due pietre, congiunte insieme, fanno una pietra maggiore che quella prima, che si moveva con otto gradi di velocità: adunque questo composto (che pure è maggiore che quella prima sola) si muoverà più

tardamente che la prima sola, che è minore; che è contro alla vostra supposizione. Vedete dunque come dal suppor che 'l mobile più grave si mostra più velocemente del men grave, io vi concludo, il più grave muoversi men velocemente.

**Simplicio:** Io mi trovo avviluppato ...

Simplicio si ritira confuso quando Salviati dimostra che la teoria aristotelica della caduta si contraddice da sola. Ma, sebbene non riesca a sconfiggere la logica di Galileo, tuttavia i suoi occhi gli dicono che un oggetto pesante cade *realmente* più velocemente di uno leggero:

**Simplicio:** Il vostro discorso procede benissimo veramente: tuttavia mi par duro a credere che una lagrima di piombo si abbia a muover così veloce come una palla d'artiglieria.

**Salviati:** Voi dovevi dire, un grano di rena come una macina da guado. Io non vorrei, Sig. Simplicio, che voi faceste come molt'altri fanno, che, divertendo il discorso dal principale intento, vi attaccaste a un mio detto che mancasse dal vero quant'è un capello, e che sotto questo capello voleste nascondere un difetto d'un altro, grande quant'una gomena da nave. Aristotele dice: "Una palla di ferro di cento libbre, cadendo dall'altezza di cento braccia, arriva in terra prima che una di una libbra sia scesa di un sol braccio"; io dico ch'ell'arrivano nello stesso tempo; voi trovate, nel farne l'esperienza, che la maggior anticipa due dita la minore, cioè che quando la grande percuote in terra, l'altra ne è lontana due dita: ora vorreste dopo queste due dita appiattar le novantanove braccia di Aristotele, e parlando solo del mio minimo error, metter sotto silenzio l'altro massimo.

Qui viene enunciato in forma molto chiara un principio metodologicamente importante: anche nel momento in cui, come in questo caso, uno scienziato sta osservando accuratamente un fenomeno naturale, la sua attenzione può essere distratta da un effetto che in realtà è di secondaria importanza, portandolo a trascurare regolarità molto più significative. Insomma, per tornare al problema della SNS da cui siamo partiti, l'importante non è che i due corpi di peso diverso che cadono dalla stessa altezza arrivino al suolo in tempi leggermente diversi, ma che ci arrivino in tempi quasi uguali!

Galilei pensò che la leggera discrepanza nei tempi d'arrivo fosse un effetto di minor conto, che una teoria più approfondita della caduta libera avrebbe certamente spiegato, come viene richiesto agli studenti che hanno affrontato l'esame nel 1969, e correttamente la attribuì alla differenza negli effetti dovuti alla resistenza dell'aria, quando questa agisce su corpi diversi per peso e dimensioni. Pochi anni dopo la morte di Galilei, l'invenzione della pompa a vuoto permise ad altri di dimostrare che egli aveva ragione: eliminata la resistenza dell'aria, corpi diversi cadono allo stesso modo e arrivano in fondo nello stesso istante. Questo esperimento fu fatto, ad esempio, lasciando cadere una piuma e una pesante moneta nello stesso istante e dalla stessa altezza dentro un tubo in cui era stato fatto il vuoto. Molto tempo dopo la morte di Galilei fu possibile formulare esattamente le leggi della resistenza dell'aria e capire perché un oggetto leggero resta indietro rispetto a uno pesante, e di quanto.

Per lo sviluppo della fisica, imparare che cosa doveva essere trascurato è stato importante quasi quanto imparare che cosa doveva essere preso in considerazione. Galilei riuscì ad analizzare correttamente il moto dei corpi in caduta libera perché fu capace di immaginare come sarebbe caduto un oggetto se non vi fosse stata la resistenza dell'aria. Questo può sembrare semplice in un'epoca come la nostra, in cui il vuoto è facile da realizzare, ma ai tempi di Galilei questa spiegazione era difficile da accettare. Per molti studiosi, come per

Aristotele stesso, il buon senso diceva che la resistenza dell'aria è sempre presente in natura, e che una piuma e una moneta non cadranno mai allo stesso modo. Perché parlare di un ipotetico moto nel vuoto, quando non si sapeva neppure se il vuoto poteva esistere? La fisica, secondo Aristotele e i suoi seguaci, deve occuparsi del mondo intorno a noi, che possiamo facilmente osservare, non di un mondo immaginario che potrebbe anche non esistere. La fisica di Aristotele ha dominato l'Europa dal XIII secolo in poi soprattutto perché molti scienziati di valore erano convinti che essa fornisse il metodo più razionale per descrivere i fenomeni naturali. Per rovesciare una dottrina così solidamente affermata occorreva far molto di più che scrivere libri contenenti valide e ragionevoli critiche, o semplicemente far cadere oggetti leggeri e oggetti pesanti dalla cima di un alto edificio, come nell'esperimento tradizionalmente attribuito a Galilei, che avrebbe fatto cadere palle di pesi diversi dalla sommità della torre di Pisa (sull'autenticità dell'episodio si nutrono oggi seri dubbi). Occorreva l'opera di una personalità complessa come quella di Galilei, grande matematico, abile sperimentatore, brillante scrittore e polemista infaticabile nella sua lotta per screditare le teorie di Aristotele e per iniziare l'era della fisica moderna.

Uno dei motivi principali del successo di Galilei fu che egli attaccò la teoria aristotelica nel suo punto più debole: egli dimostrò che la scienza, analizzando i fenomeni naturali, deve tener presente che molto spesso quelli che si presentano alla nostra osservazione nell'esperienza quotidiana non sono eventi semplici ed elementari, come credeva Aristotele che basava la sua teoria direttamente su di essi. Al contrario, gli eventi che osserviamo comunemente sono di solito molto complessi. Per esempio, nel moto di un corpo che cade si sovrappongono gli effetti di due leggi: quella che descrive il moto di caduta libera e quella che ci dà l'effetto della resistenza dell'aria. Per interpretare il fenomeno che stiamo osservando, dobbiamo cominciare dallo studio di un caso più semplice, come può essere la caduta senza resistenza, anche se questo è solo un caso ideale o un modello matematico.

Nella fisica moderna l'espressione «caduta libera» indica una caduta nella quale agisce solo la forza di gravità, mentre l'attrito dell'aria è trascurabile. Oppure si può ricorrere a un esperimento di laboratorio, in cui ci si discosta dalle comuni condizioni di osservazione; solo in seguito, dopo aver capito, uno alla volta, i singoli aspetti del fenomeno, potremo tornare ad affrontare l'evento naturale nella sua complessità.

Mentre gli argomenti usati da Galilei nella polemica contro la cosmologia aristotelica non erano nuovi, almeno per la maggior parte, il suo modo di affrontare il problema e i risultati da lui ottenuti costituirono la prima trattazione scientifica coerente del problema del moto di caduta libera dei gravi. Galilei capì che, fra tutti i moti osservabili in natura, proprio quello di caduta libera avrebbe permesso di elaborare gli strumenti per interpretare qualsiasi moto di qualsiasi corpo: spesso la genialità dello scienziato si manifesta proprio nell'individuare *quale* sia il fenomeno da studiare. Non solo per questo, ma per molti altri aspetti lo scienziato pisano anticipò atteggiamenti che in seguito divennero comuni nel mondo scientifico, e il modo in cui egli affrontò il problema del moto ci offrirà l'occasione per analizzare un metodo di ricerca che mantiene ancor oggi la sua validità. Egli era ben consapevole che lo studio del moto avrebbe dato l'avvio a tutta una serie di nuove scoperte:

*"Diamo avvio a una nuovissima scienza intorno a un soggetto antichissimo. Nulla v'è, forse, in natura, di più antico del moto, e su di esso ci sono non pochi volumi, né di piccola mole, scritti dai filosofi; tuttavia tra le sue proprietà ne trovo molte che, pur degne di essere conosciute, non sono state*

*mai finora osservate, nonché dimostrate. Se ne rilevano alcune più immediate, come quella, ad esempio, che il moto naturale dei gravi discendenti accelera continuamente; però, secondo quale proporzione tale accelerazione avvenga, non è stato sin qui mostrato [...] lo dimostrerò, insieme ad altre non poche cose, né meno degne di essere conosciute, e, ciò che ritengo ancor più importante, si apriranno le porte a una vastissima e importantissima scienza, della quale queste nostre ricerche costituiranno gli elementi; altri ingegni più acuti del mio ne penetreranno poi più ascosi recessi"*

### **Il problema della caduta dei gravi – 3: Galilei definisce il moto uniformemente accelerato**

Galilei comincia con l'esaminare da un punto di vista matematico le caratteristiche di un moto possibile e particolarmente semplice (quello che oggi chiamiamo moto uniformemente accelerato) e quindi avanza l'ipotesi che in realtà il moto di caduta dei gravi sia proprio di questo tipo. Utilizza poi questa ipotesi per prevedere il comportamento di una sfera che rotola lungo un piano inclinato e infine dimostra che gli esperimenti confermano queste previsioni, con ciò splendidamente esemplificando il procedimento tipico del metodo scientifico moderno.

Nella prima parte della sua esposizione Galilei descrive le caratteristiche del moto con velocità costante. Nella seconda parte Salviati inizia l'esame del moto accelerato:

**Salviati:** "Passeremo dunque a più sottile e nuova contemplazione intorno al moto naturalmente accelerato, quale è quello che generalmente è esercitato da i mobili gravi discendenti [...]"

Quando, dunque, osservo una pietra, che discende dall'alto a partire dalla quiete, acquista via via nuovi incrementi di velocità, perché non dovrei credere che tali aumenti avvengano secondo la più semplice e più ovvia proporzione? Ora, se consideriamo attentamente la cosa, non troveremo nessun aumento o incremento più semplice di quello che aumenta sempre nel medesimo modo. Il che facilmente intenderemo considerando la stretta connessione tra tempo e moto: come infatti la equabilità e uniformità del moto si definisce e si concepisce sulla base della eguaglianza dei tempi e degli spazi (infatti chiamiamo equabile il moto, allorché in tempi eguali vengono percorsi spazi uguali), così, mediante una medesima suddivisione uniforme del tempo, possiamo concepire che gli incrementi di velocità avvengano con [altrettanta] semplicità [...] Possiamo quindi ammettere la seguente definizione del moto di cui tratteremo: Moto equabilmente, ossia uniformemente accelerato, dico quello che, a partire dalla quiete, in tempi eguali acquista eguali momenti di velocità"

**Sagredo:** "Io, sì come fuor di ragione mi opporrei a questa o ad altra definizione che da qualsivoglia autore fusse assegnata, essendo tutte arbitrarie, così ben posso senza offesa dubitare se tal definizione, concepita ed ammessa in astratto, si adatti, convenga e si verifichi in quella sorte di moto accelerato che i gravi naturalmente discendenti vanno esercitando."

Nel passo appena citato, Sagredo si chiede se la definizione arbitraria di accelerazione, data da Galilei, descriva effettivamente il cambiamento di velocità che avviene negli oggetti in caduta libera. Egli si preoccupa anche di un altro aspetto del problema, non ancora preso in considerazione da Galilei:

**Sagredo:** "Da questo discorso mi par che si potrebbe cavare una assai congrua ragione della quistione agitata tra i filosofi, qual sia la causa dell'accelerazione del moto naturale de i gravi [...]"

Ma Salviati, il portavoce di Galilei, respinge l'antica tendenza a studiare i fenomeni cercandone prima di tutto le cause, dichiarando che è prematuro farlo prima di avere una descrizione accurata del moto che si sta esaminando:

**Salviati:** "Non mi par tempo opportuno d'entrare al presente nell'investigazione della causa dell'accelerazione del moto naturale, intorno alla quale da varii filosofi varie sentenze sono state prodotte, riducendola alcuni all'avvicinamento al centro, altri al restar successivamente manco parti del mezo da fendersi, altri a una certa estrusione del mezo ambiente, il quale, nel ricongiungersi a tergo del mobile, lo va premendo e continuamente scacciando; le quali fantasie, con altre appresso, converrebbe andare esaminando e con poco guadagno risolvendo. Per ora basta al nostro Autore che noi intendiamo che egli vuole investigare e dimostrare alcune passioni di un moto accelerato (qualunque si sia la causa della sua accelerazione)"

In questo passo Salviati allude all'ipotesi aristotelica secondo la quale l'aria avrebbe spinto in avanti gli oggetti che la attraversano.

Nei brani precedenti Galilei ha introdotto due distinte affermazioni: (1) si ha un'accelerazione costante quando si verificano uguali incrementi di velocità  $\Delta v$  in uguali intervalli di tempo  $\Delta t$ ; (2) nella realtà gli oggetti cadono proprio secondo questa legge. Consideriamo più attentamente la definizione proposta da Galilei. Quello che abbiamo appena esposto non è affatto l'unico modo possibile per definire un'accelerazione costante: Galilei stesso afferma di avere, in un primo tempo, ritenuto opportuno l'uso del termine «accelerazione costante» nel caso di un moto in cui la variazione di velocità è proporzionale allo spazio percorso,  $\Delta s$ , invece che al tempo trascorso  $\Delta t$ . Entrambe le definizioni possedevano quella semplicità che Galilei riteneva necessaria (e entrambe erano state discusse fin dagli inizi del XIV secolo); inoltre, entrambe corrispondono abbastanza bene alla nostra idea intuitiva di accelerazione. Nel linguaggio comune, affermare che un corpo sta «accelerando», può significare sia che "la velocità cresce quando aumenta lo spazio percorso", sia che "la velocità cresce col passare del tempo". Come possiamo scegliere una di queste definizioni e decidere quale sarà più utile nella descrizione della natura? Il dilemma può essere risolto solo da un controllo sperimentale. Galilei scelse di dare il nome di moto uniformemente accelerato a quello in cui la variazione di velocità  $\Delta v$  è proporzionale al tempo trascorso  $\Delta t$ , per poi dimostrare che gli oggetti reali, sia in laboratorio sia nell'esperienza quotidiana, si comportano in questo modo. Come vedremo in seguito, la sua scelta era giusta, ma vedremo anche che il controllo sperimentale non poté essere effettuato in modo semplice e diretto.

## **Il problema della caduta dei gravi – 4: Impossibilità di verifica sperimentale diretta dell'ipotesi di Galilei**

Galilei aveva definito l'accelerazione costante in modo che corrispondesse alla sua ipotesi sul moto degli oggetti in caduta libera; doveva ora trovare un modo per descrivere il moto che effettivamente osserviamo dei corpi.

Supponiamo di far cadere un oggetto pesante da altezze diverse (per esempio da finestre di piani diversi di un edificio) e di voler controllare se la velocità finale è proporzionale al tempo di caduta, cioè se  $\Delta v \propto \Delta t$  o, in altre parole, se  $\Delta v/\Delta t$  è costante. In ogni esperimento dovremo misurare il tempo impiegato e determinare la velocità dell'oggetto immediatamente prima che tocchi il suolo. Purtroppo, ancora oggi sarebbe molto difficile misurare

direttamente la velocità di un oggetto che sta per toccar terra; non solo, ma anche i tempi di caduta (meno di 3 secondi per un oggetto che cada dal tetto di un edificio di 10 piani) erano troppo piccoli perché Galilei potesse misurarli accuratamente con gli orologi a sua disposizione.

Egli quindi non era in grado di controllare in maniera diretta se  $\Delta v/\Delta t$  fosse costante. L'impossibilità di verificare con esperienze dirette la sua ipotesi, cioè che  $\Delta v/\Delta t$  è costante durante una caduta libera, non fermò Galilei: egli cercò allora, con l'aiuto di metodi matematici, di ricavare dalla sua ipotesi qualche altra relazione che potesse essere controllata con gli strumenti a sua disposizione. È chiaro che è più semplice misurare il tempo e lo spazio relativi a tutta la caduta che non i piccoli intervalli  $\Delta s$  e  $\Delta t$ , necessari per calcolare la velocità finale. Quindi Galilei cercò di dedurre logicamente dalla sua ipotesi, cioè che l'accelerazione fosse costante, una relazione tra l'altezza totale di caduta e il tempo impiegato. Non seguiremo esattamente il ragionamento di Galilei, pur arrivando agli stessi risultati. Prima di tutto ricordiamo che la velocità media è definita come il rapporto tra lo spazio percorso  $\Delta s$  e il tempo  $\Delta t$  impiegato a percorrerlo. Quindi

$$\Delta s = v_m \Delta t$$

In un moto uniformemente accelerato di tipo più generale la velocità media sarebbe:

$$v_m = (v_i + v_f)/2$$

Se la velocità fosse costante, sarebbe  $v_m = v$  e quindi  $\Delta s = v \Delta t$  e conoscendo  $v$  potremmo calcolare lo spazio percorso in un dato intervallo di tempo. Ma in un moto uniformemente accelerato la velocità cambia continuamente: che valore possiamo usare per  $v_m$ ? Galilei (come altri prima di lui) arrivò a concludere che, se una quantità varia uniformemente, il suo valore medio è a metà tra il valore iniziale e quello finale. Per un corpo inizialmente fermo (per il quale cioè la velocità iniziale  $v_i$  è uguale a zero) che si muove di moto uniformemente accelerato fino a raggiungere una velocità finale  $v_f$  la velocità media sarà  $v_m = 2v_f$ . Se questo ragionamento è giusto, per un moto uniformemente accelerato con  $v_i = 0$  si avrà:

$$\Delta s = v_f \Delta t/2$$

Nemmeno questa relazione può essere controllata direttamente, perché contiene la velocità finale, difficile da misurare: ci occorre una relazione tra il tempo totale e la distanza totale, in cui non sia necessario misurare la velocità. Consideriamo la definizione di accelerazione costante data da Galilei:

$$a = \Delta v/\Delta t$$

che può essere riscritta come  $\Delta v = a \Delta t$ . Ma  $\Delta v$  non è altro che  $v_f - v_i$ ; inoltre  $v_i = 0$  se il moto inizia dalla quiete. Possiamo quindi scrivere:

$$\Delta s = v_f \Delta t/2 = a (\Delta t)^2/2$$

Questa è proprio la relazione cercata da Galilei: infatti esprime lo spazio percorso totale  $\Delta s$  in funzione del tempo totale di caduta  $\Delta t$  e non contiene la velocità.

Si può semplificare la notazione usata in quest'equazione, affinché essa risulti più semplice da adoperare. Se misuriamo spazi e tempi iniziando dalla posizione e dall'istante in cui comincia il moto, partendo dalla quiete, allora  $\Delta s = s$  e  $\Delta t = t$ . L'equazione precedente diventa:

$$s = at^2/2$$

Galilei ottenne lo stesso risultato, anche se non lo espresse in forma algebrica. Dato che in questo caso particolare  $a$  è costante, il risultato ottenuto dimostra che quando un corpo inizialmente fermo si muove di moto uniformemente accelerato, lo spazio percorso è proporzionale al quadrato del tempo impiegato a percorrerlo. Per esempio, se un'automobile che accelera uniformemente percorre 10 m nel primo secondo, in un tempo *doppio* percorrerà uno spazio *quattro volte* più grande, cioè 40 m nei primi 2 secondi; nei primi 3 secondi lo spazio sarà 9 volte più grande, cioè 90 m.

La stessa relazione si può anche esprimere dicendo che il rapporto tra  $s$  e  $t^2$  è costante e pari a metà dell'accelerazione. Dunque se in un moto che inizi dalla quiete il rapporto  $s/t^2$  rimane costante per diversi valori degli spazi e dei tempi corrispondenti, risulta che l'accelerazione del corpo in moto è costante.

## Il problema della caduta dei gravi – 5: verifica indiretta dell'ipotesi

Non abbiamo ancora verificato l'ipotesi che i corpi in caduta libera si muovono effettivamente secondo questa legge. Ai tempi di Galilei era però molto difficile misurare il tempo di caduta; quindi, invece di fare una verifica diretta, egli dovette compiere ancora un ulteriore passo ed escogitare un'ingegnosa verifica indiretta.

Galilei, rendendosi conto che il moto di un oggetto che cade liberamente è troppo rapido per permettere misure accurate, studiò la possibilità di compiere l'esperimento su un oggetto meno veloce. Dovette però introdurre un'ulteriore ipotesi: se un corpo in caduta libera si muove con accelerazione costante, allora una palla perfettamente sferica, che rotola lungo un piano inclinato perfettamente liscio, avrà anch'essa un'accelerazione costante, anche se minore.

Ecco come Salviati descrive l'esperimento compiuto da Galilei, nel dialogo tratto da *Le due nuove scienze*, giornata terza:

**Salviati:** "In un regolo, o vogliàn dir corrente, di legno, lungo circa 12 braccia, e largo per un verso mezo braccio e per l'altro 3 dita, si era in questa minor larghezza incavato un canaletto, poco più largo d'un dito; tiratolo drittissimo, e, per averlo ben pulito e liscio, incollatovi dentro una carta pecora zannata e lustrata al possibile, si faceva in esso scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotolata e pulita; costituito che si era il detto regolo pendente, elevando sopra il piano orizzontale una delle sue estremità un braccio o due ad arbitrio, si lasciava (come dico) scendere per il detto canale la palla, notando, nel modo che appresso dirò, il tempo che consumava nello scorrerlo tutto, replicando il medesimo atto molte volte per assicurarsi bene della quantità del tempo, nel quale non si trovava mai differenza né anco della decima parte d'una battuta di polso. Fatta e stabilita precisamente tale operazione, facemmo scender la medesima palla solamente per la quarta parte della lunghezza di esso canale; e misurato il tempo della sua scesa, si trovava sempre puntualissimamente esser la metà dell'altro: e facendo poi l'esperienza di altre parti, esaminando ora il tempo di tutta la lunghezza col tempo della metà, o con quello delli duo terzi o in conclusione con qualunque altra divisione, per esperienze ben cento volte replicate sempre s'incontrava, gli spazii passanti esser tra di loro come i quadrati de i tempi, e questo in tutte le inclinazioni del piano, cioè del canale nel quale si faceva scender la palla [...]"

Notate con quanta cura viene descritto l'apparato usato nella esperienza. Uno sperimentatore moderno aggiungerebbe soltanto i disegni

particolareggiati, gli schemi e le fotografie dell'apparato, come il pittore del quadro qui riprodotto:



*Un esperimento che Galilei avrebbe compiuto quando insegnava a Pisa, in un dipinto di G. Bezzuoli del 1841. Ai due lati stanno gli avversari di Galilei: il principe Giovanni de' Medici (Galilei aveva dimostrato l'inutilizzabilità di una draga da lui inventata) e i rappresentanti del potere accademico. Questi sono curvi su un testo di Aristotele dove è scritto che corpi di peso diverso cadono con velocità diseguali. Galilei è raffigurato nel personaggio più alto, al centro del dipinto, circondato da un gruppo di studenti e discepoli.*

In queste poche righe Galilei concentra un gran numero di informazioni. Descrive procedimento e apparecchi tanto chiaramente da permettere ad altri di ripetere l'esperimento, indica come possono essere fatte misure sistematiche, ed enuncia i due risultati sperimentali più importanti che confermano la sua ipotesi sulla caduta libera.

1) Prima di tutto, egli trovò che se l'angolo d'inclinazione del piano è costante, il rapporto tra lo spazio percorso e il quadrato del tempo impiegato dalla sfera a scendere è costante.

2) In secondo luogo, Galilei studiò l'effetto che si ottiene variando l'angolo d'inclinazione del piano e trovò che ancora il rapporto tra lo spazio percorso e il quadrato del tempo impiegato dalla sfera a scendere è costante, pur dipendendo dall'angolo di inclinazione del piano.

Questa lunga catena di deduzioni teoriche e verifiche sperimentali a una prima lettura può sembrare lunga e complicata e suscita qualche dubbio. Ci si può chiedere, ad esempio, se le misure di tempo effettuate da Galilei erano davvero tanto precise da consentirgli di affermare con sicurezza che  $s/t^2$  rimaneva costante, anche per un oggetto che si muoveva lentamente. Nel suo libro egli cerca di prevenire eventuali critiche descrivendo dettagliatamente l'attrezzatura adoperata (e quindi suggerendo implicitamente ad eventuali lettori poco convinti, di provare da sé):

*"Quanto poi alla misura del tempo, si teneva una gran secchia piena d'acqua, attaccata in alto, la quale per un sottil cannellino, saldatogli nel fondo, versava un sottil filo d'acqua, che s'andava ricevendo con un piccol bicchiere per tutto 'l tempo che la palla scendeva nel canale e nelle sue parti: le particelle poi dell'acqua, in tal guisa raccolte, s'andavano di volta in volta con esattissima bilancia pesando, dandoci le differenze e proporzioni de i pesi loro le differenze e proporzioni de i tempi; e questo con tal giustezza, che, come ha detto, tali operazioni, molte e molte volte replicate, già mai non differivano d'un notabil momento".*

L'orologio ad acqua descritto da Galilei non era una sua invenzione: si ha notizia dell'esistenza di orologi ad acqua in Cina fin dal VI secolo a.C., e probabilmente essi furono usati ancor prima in Babilonia e in India. Nei primi anni del '600 un buon orologio ad acqua era lo strumento più preciso allora disponibile per la misura di piccoli intervalli di tempo, e tale rimase fino a poco dopo la morte di Galilei, quando i lavori di Christiaan Huygens e di altri permisero di costruire orologi a pendolo utilizzabili praticamente. Con questi orologi, più precisi, fu possibile confermare i risultati ottenuti da Galilei per il moto su un piano inclinato.

Un'altra obiezione che si può rivolgere al lavoro di Galilei riguarda la grande differenza che passa tra il moto di caduta libera e quello di una sfera che rotola per una leggera discesa. Galilei non ci dice quali angoli d'inclinazione fossero usati nel suo esperimento, ma, eseguendone uno analogo, si vede che essi devono essere abbastanza piccoli, perché per angoli più grandi la velocità della sfera aumenta tanto da rendere difficile la misura dei tempi. Dalle ripetizioni dell'esperimento di Galilei risulta che il massimo angolo utilizzabile è meno di  $10^\circ$ , e non sembra che Galilei abbia lavorato con angoli più grandi. Questo vuol dire che l'estrapolazione al caso della caduta libera (inclinazione di  $90^\circ$ ) può apparire eccessiva ad uno scettico che non sia convinto in partenza delle tesi di Galilei.

Vi è ancora un altro motivo per mettere in dubbio i risultati di Galilei: se si aumenta l'angolo d'inclinazione, a un certo punto la sfera comincia a scivolare oltre che a rotolare e in questo caso la legge del moto potrebbe cambiare. Galilei non esamina questa possibilità ed è strano che (per quanto ne sappiamo) egli non abbia mai ripetuto i suoi esperimenti con blocchi che scivolassero lungo un piano inclinato, invece di rotolare. Avrebbe trovato che, anche in questo caso, il rapporto  $s/t^2$  rimane costante, pur avendo un valore diverso da quello che si ottiene per oggetti che rotolano, con lo stesso angolo d'inclinazione del piano.

## **Il problema della caduta dei gravi – 6: Conclusioni**

Galilei non tentò di calcolare il valore numerico dell'accelerazione di un corpo in caduta libera, probabilmente perché si rendeva conto che non avrebbe potuto ottenerne uno attendibile semplicemente estrapolando i risultati già ottenuti. Per i suoi scopi era sufficiente aver confermato l'ipotesi che l'accelerazione di un corpo che scende, cadendo o rotolando, è costante. Questa è la prima conclusione raggiunta dal lavoro di Galilei, confermata poi da tutti i controlli successivi.

In secondo luogo, abbiamo visto che sfere di peso diverso, che rotolano lungo un piano inclinato secondo un determinato angolo, hanno tutte la stessa accelerazione. Non sappiamo quanti dati sperimentali fossero a disposizione di Galilei per confermare questa ipotesi, ma essa si accorda con i risultati dell'osservazione di oggetti in caduta libera. Essa concorda anche con i suoi «esperimenti ideali», che dimostravano come corpi di peso diverso dovessero cadere in tempi eguali, a patto di non considerare effetti dovuti alla resistenza dell'aria. I suoi risultati confutano in maniera decisiva la teoria del moto di Aristotele e determinano una legge universale, ossia valida per tutti i corpi: se alcuni corpi salgono invece di scendere è solo perché si trovano immersi in un mezzo che, possedendo una densità maggiore, li spinge verso l'alto secondo il principio scoperto da Archimede.

In terzo luogo, Galilei sviluppò una teoria matematica del moto da cui si possono ricavare altre previsioni. Qui considereremo solo un esempio. Come ricorderete, Galilei definì l'accelerazione come il rapporto tra la variazione di velocità e l'intervallo di tempo. Successivamente egli verificò sperimentalmente che i corpi che cadono subiscono uguali variazioni di velocità in tempi uguali e non su distanze uguali, come inizialmente era stato supposto. Ma l'idea di qualcosa che varia di quantità uguali su distanze uguali è attraente per la sua semplicità, e ci si può chiedere se non esista nel moto uniformemente accelerato qualche grandezza che si comporta effettivamente in questo modo. La risposta è affermativa: è possibile dimostrare algebricamente, senza fare nuove ipotesi, che, per un corpo inizialmente fermo che si muove con accelerazione costante, il quadrato della velocità subisce incrementi uguali su distanze uguali. Più tardi, questo enunciato rappresenterà la legge di conservazione dell'energia meccanica.

Queste conclusioni raggiunte da Galilei, pur essendo molto importanti per lo sviluppo della fisica, non erano certo sufficienti da sole a provare una rivoluzione scientifica: nessuno studioso di buon senso, nel '600, avrebbe abbandonato la cosmologia aristotelica solo perché alcune delle asserzioni in essa contenute erano state smentite nel caso dei corpi che cadono (o rotolano). Il lavoro di Galilei sul moto dei corpi in caduta libera contribuì però ad aprire la strada verso una nuova fisica e una nuova cosmologia, insinuando il dubbio sulle ipotesi che stavano alla base della fisica aristotelica. Per esempio, una volta ammesso che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione se la resistenza dell'aria è trascurabile, viene meno tutta la spiegazione aristotelica del moto di caduta dei gravi. Con le sue ricerche sulla meccanica egli diede alla scienza un nuovo metodo di ricerca, valido ancora oggi. Il metodo di Galilei viene da lui stesso sintetizzato in una affermazione: "*sensate esperienze e necessarie dimostrazioni*". Le *sensate esperienze* superano le percezioni qualitative e immediate dei sensi e consistono di esperimenti eseguiti impiegando strumenti sempre più raffinati e progettati in modo che le risposte della natura siano quantitative e inequivocabili; attraverso le *necessarie dimostrazioni* si raggiunge la chiara evidenza che una data legge fisica implichi o non implichi questa o quella conseguenza, empiricamente controllabile. L'appello all'esperienza significa quindi appello ad eseguire delle misure precise delle grandezze fisiche; solo la misurazione accurata consente di descrivere con esattezza il decorso dei fenomeni e poi di inquadrare i risultati delle misure in una legge formulata nel linguaggio della matematica. Ma la matematica non solo offre un linguaggio sintetico preciso e rigoroso, ma soprattutto facilita il controllo sperimentale delle leggi: più sarà precisa l'interrogazione che noi poniamo alla natura, più sarà determinata la risposta che ne otterremo. Il metodo dunque si basa su un ciclo, che può essere ripetuto interamente o in parte, finché si arriva a una teoria soddisfacente: osservazioni e misure -> ipotesi -> analisi matematica o deduzione dalle ipotesi -> controllo sperimentale delle deduzioni -> modifica delle ipotesi alla luce dei risultati sperimentali, e così via. Questo ciclo di osservazioni, ipotesi, deduzioni, misure, controlli, modifiche ecc., così acutamente illustrato da Galilei nel '600, è ancora oggi una componente fondamentale della ricerca scientifica. Sebbene forse non esista un *unico* metodo scientifico, questo schema è quasi sempre presente, in qualche forma, nella ricerca scientifica, non solo per il condizionamento storico dovuto all'eredità galileiana, ma anche perché esso si è dimostrato applicabile e efficace nella maggior parte dei casi.

## La scelta del riferimento: principio di inerzia e principio di relatività

*"Le difficoltà degli studenti nel capire sia il principio di inerzia che l'idea di forza sorgono in gran parte perché la maggior parte delle persone assorbe dal senso comune una grande quantità di preconcetti e di regole sul comportamento dei corpi prima di conoscere la fisica newtoniana. Alcuni di questi punti di vista sono aristotelici: per esempio, l'idea che sia necessaria l'azione di una forza costante per mantenere un corpo in movimento, ma molti di essi ricordano la nozione medioevale di impetus, associata ai nomi di Buridano e Oresme. Tornando all'idea aristotelica citata come esempio occorre riconoscere che in effetti è molto difficile smettere di pensare allo stato di quiete come a qualcosa di radicalmente diverso da quello di moto"*

[Arnold B. Arons, *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, Bologna, 1992]

Convincersi dell'equivalenza tra lo stato di quiete e lo stato di moto rettilineo uniforme significa andare verso la comprensione del principio di relatività galileiano. Con Aristotele, viceversa, viene affermata l'esistenza di un sistema di riferimento assoluto; non in modo esplicito, certamente, ma attraverso la negazione del moto di rotazione terrestre e l'affermazione che la Terra, immobile, è al centro dell'universo. Per Aristotele non vi può essere moto violento senza una causa, un corpo può essere mantenuto in movimento solamente se si trova in contatto diretto con un "motore operante in continuazione".

La teoria dell'*Impetus* è una correzione medioevale alla concezione aristotelica, sviluppata dai filosofi Giovanni Buridano, Nicole Oresme e da altri nel XIV secolo. Ecco come viene enunciata per spiegare il moto di un sasso in aria: *"Il lanciatore imprime un certo impeto o forza motrice al corpo mobile, il quale impeto agisce nella direzione verso cui il motore ha spinto il corpo mobile [...] è da questo impeto che la pietra viene mossa dopo che il lanciatore cessa la sua azione. Ma l'impeto è continuamente ridotto dalla resistenza dell'aria e dalla gravità della pietra che la fa deviare in una direzione contraria a quella in cui l'impeto era naturalmente predisposto a farla muovere. Così il moto della pietra diventa sempre più lento, finché l'impeto è così ridotto o alterato che la gravità della pietra lo vince e spinge la pietra in giù al suo luogo naturale"*

Spesso gli studenti riproducono questa descrizione del moto dei proiettili. Essi sono convinti che il moto di un proiettile sia causato da una forza *interna* al proiettile, appunto *l'impetus*, acquisito dal corpo quando viene messo in moto. La teoria dell'*Impetus* si applica nello stesso modo al moto circolare; un oggetto in moto su una traiettoria circolare ha un impeto circolare, che mantiene fin quando il moto non cessa. Quindi il moto circolare viene considerato non fondamentalmente diverso dal moto rettilineo; in entrambi i casi basta impartire al corpo l'impeto appropriato. Il concetto di impeto circolare spiegava il perdurare della rotazione di un volano e la rotazione delle sfere celesti in cui erano infissi i pianeti.

Quando uno studente spiega il moto dei corpi rifacendosi alla teoria dell'*Impetus*, stabilisce una distinzione tra lo stato di quiete, in cui un corpo non possiede *impetus*, e lo stato di moto in cui *l'impetus* può essere presente. Dunque nega il principio d'inerzia in base alla motivazione *"omne quod movetur ab alio movetur"*.

Galilei enunciò con chiarezza nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* che non esiste una distinzione tra lo stato di quiete e quello di moto rettilineo uniforme:

*"Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti;*

*siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina oppure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nuvoletta trattenervisi, e indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte. E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che per ciò dissi io che si stesse sotto coverta; ché quando si stesse di sopra e nell'aria aperta e non seguace del corso della nave, differenze più e men notabili si vedrebbero in alcuni de' gli effetti nominati: e non è dubbio che il fumo resterebbe in dietro, quanto l'aria stessa; le mosche parimente e le farfalle, impedita dall'aria, non potrebb' seguir il moto della nave, quando da essa per spazio assai notevole si separassero; ma trattenendovisi vicine, perché la nave stessa, come di fabbrica anfrattuosissima, porta seco parte dell'aria sua prossima, senza intoppo o fatica seguirebbon la nave, e per simil cagione veggiamo tal volta, nel correr la posta, le mosche importune e i tafani seguir i cavalli, volandogli ora in questa ed ora in quella parte del corpo; ma nelle goccioline cadenti pochissima sarebbe la differenza, e ne i salti e ne i proietti gravi, del tutto impercettibile."*

Ma come arriva Galilei a questa formulazione? Dapprima attacca le ipotesi fondamentali del sistema geocentrico, avvalendosi delle osservazioni astronomiche eseguite con il cannocchiale di sua ideazione dalla specola di Padova. Poi Galilei discute il moto di caduta dei gravi, presentando lo studio del moto del pendolo e di una sfera che rotola su un piano inclinato. Estrapolando quest'ultimo moto, Galilei arriva alla formulazione del principio d'inerzia.

Ecco l'esperimento ideale illustrato da Galilei: egli asserisce che una sfera, dopo essere scesa da un piano inclinato, risale un secondo piano inclinato posto

di fronte al primo raggiungendo quasi la medesima altezza. Effettuando l'esperimento si osserva che la sfera tanto più si avvicina alla posizione posta all'altezza di partenza quanto più i piani sono levigati, vale a dire quanto più si riducono gli attriti. Se l'inclinazione del secondo piano viene diminuita, la sfera deve percorrere un cammino sempre più lungo per arrivare alla medesima altezza. Dunque la perdita di velocità avviene tanto più lentamente quanto minore è l'inclinazione del piano. Galilei estrapolò che se il secondo piano fosse orizzontale allora la sfera non potrebbe raggiungere la posizione posta all'altezza di partenza e quindi continuerebbe a rotolare per sempre, muovendosi con velocità costante in linea retta. Il principio d'inerzia stabilisce che lo stato naturale di un corpo, ossia lo stato non richiedente causa alcuna per essere mantenuto, non è soltanto la quiete, ma anche il moto rettilineo uniforme.

Dopo aver giustificato il principio d'inerzia, Galilei procede a spiegare il moto dei proiettili attraverso la scomposizione del moto in una parte orizzontale che, in virtù del principio d'inerzia, consiste di un moto uniforme e in una parte verticale che, in virtù della legge stabilita sulla caduta libera dei corpi, consiste di un moto uniformemente accelerato. Leggendo il *Dialogo* si percepisce che Galilei ebbe chiara comprensione dell'invarianza dei fenomeni osservati in riferimenti in moto relativo traslatorio uniforme, e della composizione dei movimenti.

Infine, con l'esempio del *navilio*, Galilei intende affermare che in base alle osservazioni ed agli esperimenti di meccanica compiuti all'interno di un sistema non si può decidere se il sistema stesso sia in quiete o in moto rettilineo uniforme. In altre parole, un movimento comune a tutti i corpi che formano un determinato sistema non esercita alcuna influenza sul comportamento reciproco di quei corpi e di conseguenza non può mai essere dimostrato all'interno di quel sistema. Galilei inserisce questa enunciazione del principio di relatività all'interno della polemica contro Aristotele, che riteneva immobile il globo terrestre. Secondo Aristotele, i corpi in caduta da una torre, per esempio, si dirigono verso il centro della Terra, spostandosi lungo la retta che congiunge il punto di partenza del moto col centro della Terra. Durante la caduta, però, la superficie della Terra si sposta verso Est. Usando dati già noti agli studiosi Arabi, il corpo dovrebbe dunque cadere non alla base della torre, ma molto più a Ovest: circa 1 Km, nel caso di una torre all'equatore alta 23 m. Il calcolo della velocità di un punto situato sulla superficie terrestre all'equatore può essere fatto svolgere per esercizio anche agli studenti, che spesso restano sorpresi dal valore trovato, 1667 km/h ossia 463 m/s. Per quanto si può osservare, la pietra cade esattamente sulla verticale del punto di partenza. Molti critici di Galilei erano dunque convinti che non si potesse considerare la Terra in movimento.

Per rispondere a queste obiezioni, Galilei fece notare che quelle stesse osservazioni potevano essere considerate argomenti a favore della sua tesi, secondo la quale, durante la caduta, la torre e il suolo su cui essa poggia si muovono insieme con la medesima velocità. La pietra, finché si trova sulla cima della torre, ha la stessa velocità orizzontale di quest'ultima, ma quando cade, acquista una velocità verticale che, per il principio di indipendenza dei moti non interferisce con quella orizzontale posseduta all'inizio. Poiché la pietra e la torre continuano ad avere sempre la stessa velocità orizzontale, la pietra non rimane indietro, ma atterra alla base della torre, qualunque sia la velocità della Terra. Quindi il fatto che le pietre cadendo non restino indietro, non è una prova dell'immobilità della Terra.

Analogamente, diceva Galilei, un oggetto lasciato cadere dalla cima dell'albero di una nave, perpendicolarmente al ponte, cadrà ai piedi dell'albero stesso, sia che la nave sia ancorata nel porto, sia che essa si stia muovendo

con velocità costante in acque tranquille. Da molte osservazioni quotidiane possiamo trarre conferma della validità delle idee di Galilei: se in autobus, in treno o in aereo, che viaggi con velocità costante, si lascia cadere un oggetto, esso si muove proprio come se il veicolo fosse fermo. Va ricordato che in un altro punto del *Dialogo*, nella giornata seconda, Galilei aveva accennato al fatto che una palla lasciata cadere da una torre verrà sì deviata, ma verso Est e non verso Ovest, per effetto, secondo la descrizione moderna, della forza di Coriolis (la stessa forza responsabile del comportamento del pendolo di Foucault). La spiegazione galileiana del fenomeno è comunque corretta: *"nell'avvicinarsi alla Terra il moto in giro ha da essere fatto continuamente per cerchi minori: talchè, mantenendosi nella palla quella medesima velocità [principio di inerzia] dovrebbe anticipare, come ho detto, la vertigine della Terra"*.

Il principio di relatività galileiano vale per tutti i fenomeni trattati dalla meccanica classica, cioè per quei fenomeni che riguardano corpi macroscopici e che si svolgono a velocità molto minore della velocità della luce. Esso costituisce un enunciato di grande generalità che spiega il fallimento delle osservazioni escogitate dagli antichi allo scopo di mostrare la rotazione terrestre, nello stesso modo in cui il principio di relatività di Einstein spiegherà l'impossibilità di evidenziare il moto della Terra attraverso l'etere, come fu mostrato da Michelson e Morley. In una splendida opera di elevata divulgazione della fisica, Gamow si rifà a Galilei per descrivere il più celebre esperimento del '900:

*"Rinserratevi con qualche amico in un grande laboratorio sulla Terra e quivi fate d'aver sorgenti di luce, specchi ed altri istrumenti ottici; sianvi anco tutti li tipi di istrumenti per la misura di forze elettriche, forze magnetiche, correnti e altre cose. Persuadetevi indi con la logica ragione che se la Terra fusse ferma nello spazio, la propagazione de i raggi di luce, l'interazione de le cariche, de li magneti e de li correnti elettriche non dipenderebbe de li loro posizioni relative e da le direzioni rispetto a le pareti del laboratorio. Fate dunque che la Terra si mova intorno al Sole, come del resto è, e col Sole attorno al centro del sistema stellare de la Via Lattea. Voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li sunnominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprendere se la Terra si move o pure sta ferma"*

Comunque venga enunciato, il principio di relatività galileiano stabilisce che esiste una classe di sistemi di riferimento, detti inerziali, che si muovono uno rispetto all'altro con moto inerziale (ossia traslatorio uniforme), che risultano tra loro equivalenti, nel senso che le leggi che descrivono il comportamento dei corpi hanno la stessa forma matematica nei differenti riferimenti. Cosa possiamo dire di uno stesso fenomeno osservato da sistemi di riferimento diversi? Certamente alcuni aspetti del fenomeno appariranno differenti ad osservatori che usano sistemi di riferimento differenti. Per esempio, la posizione di un corpo assumerà valori differenti se misurata rispetto ad un riferimento o rispetto ad un altro in moto relativamente al primo. Ma esistono sia grandezze fisiche che non variano, sia relazioni tra grandezze fisiche, ossia leggi fisiche, che assumono la stessa forma matematica, indipendentemente dalla scelta del riferimento. Quindi il principio di relatività non significa che «tutto è relativo», ma anzi suggerisce che le relazioni che non cambiano quando si cambia sistema di riferimento siano quelle fisicamente più rilevanti. L'eredità che lascia Galilei ai suoi successori è il compito di determinare proprio le grandezze invarianti rispetto alla trasformazione del sistema di riferimento, che sono le grandezze fondamentali nella moderna fisica teorica.

## Le osservazioni astronomiche di Galilei e la disputa cosmologica

Gli interessi di Galilei sono stati, nella sua vita movimentata, vasti e molteplici: la sua opera e il suo metodo di lavoro aprirono nuovi orizzonti in campi applicativi, come la meccanica e l'ottica, e in campi astratti come la matematica. Ma forse il campo scientifico a cui egli si dedicò con più entusiasmo, convinto che in esso si giocasse la battaglia tra la morente fisica aristotelica e la nuova scienza, fu l'astronomia.

Il problema che suscitava maggiori discussioni ai tempi di Galilei infatti, non riguardava la meccanica, ma rientrava invece nel campo dell'astronomia: era quello di decidere se il centro dell'Universo fosse la Terra, oppure il Sole. Gli aristotelici affermano: *"Noi vediamo de i corpi semplici i più crassi e gravi occupare i luoghi inferiori (come si vede fare alla terra rispetto all'acqua ed all'acqua rispetto all'aria); ma la Terra è corpo più crasso del Sole, e il luogo inferiore dell'universo è il centro; adunque la Terra, e non il Sole, occupa il centro"*. Galilei articola la confutazione di questo ragionamento in due punti: 1) i concetti di luogo superiore o inferiore non hanno un significato assoluto, ma relativo: sulla Luna o sul Sole il luogo inferiore corrisponde al luogo superiore per chi si trovi sulla Terra; 2) non è affatto ovvio che la Terra sia corpo più crasso del Sole, anzi, la contrario, se vogliamo concedere ad Aristotele che il Sole sia inalterabile e incorruttibile pare plausibile ritenerlo costituito da materia più crassa di quella terrestre, più simile al diamante che all'aria.

Galilei sosteneva che la Terra e gli altri pianeti giravano attorno al Sole e questa tesi, che contrastava totalmente la cosmologia aristotelica, richiedeva la costruzione di una teoria fisica che spiegasse le cause del moto della Terra e le leggi che esso seguiva. Proprio il lavoro di Galilei, riguardante la caduta dei gravi e altri tipi di moto, pose le prime basi per la costruzione di questa teoria. La sua importanza si rivelò chiaramente solo quando esso venne integrato nel quadro delle ricerche sulle forze che agiscono sui corpi in moto, effettuate dallo scienziato inglese Isaac Newton, il quale riconobbe in Galilei il precursore della nuova astronomia, come ben rammenta il Foscolo: *"... vide / sotto l'etereo padiglion rotarsi / più mondi, e il Sole irradiarli immoto, / onde all'Anglo che tanta ala vi stese / sgombrò per primo le vie del firmamento"*

Il contributo più importante di Galilei all'astronomia è tipico del suo modo di lavorare, e della sua capacità di collegare fatti e idee molto diverse, afferrando l'importanza di scoperte apparentemente irrilevanti: egli fu il primo a utilizzare per l'osservazione dei cieli uno strumento ottico, il cannocchiale. Verso il 1610 gli giunse la notizia che un olandese aveva fabbricato un occhiale, mediante il quale gli oggetti visibili, per quanto molto distanti all'occhio dell'osservatore, si vedevano distintamente come fossero vicini. Galilei, secondo quanto ci racconta lui stesso, trovò rapidamente alcuni principi d'ottica collegati a questo fenomeno, e si dedicò alla lavorazione delle lenti per costruire un analogo strumento. Il suo primo cannocchiale gli consentiva di vedere tre volte più vicino che a occhio nudo. Egli riferisce, a proposito del suo terzo cannocchiale: *"Finalmente, non risparmiando fatica né spesa alcuna, sono giunto a tal punto a costruirmi uno strumento così eccellente, che le cose vedute per mezzo di esso appaiono quasi mille volte più grandi e più di trenta volte più vicine che si guardino con la sola facoltà naturale"*. Galilei voleva esprimere il fatto che l'area dell'oggetto risultava mille volte maggiore. L'area è proporzionale al quadrato dell'ingrandimento (o «potere di ingrandimento»), come esso viene definito attualmente.

Se voi foste stati al suo posto, per qual scopo avreste usato "un così eccellente strumento"? Come i contemporanei di Galilei, voi probabilmente

l'avreste usato per fini pratici. Non che Galilei abbia tralasciato questo aspetto: perennemente bisognoso di denaro, per mantenere la sua numerosa famiglia, fornire la dote alle sorelle e pagare i debiti del fratello, si affrettò a vendere il cannocchiale come sua invenzione alla Repubblica Veneta. Tuttavia, egli ebbe anche l'idea di utilizzarlo per scopi scientifici, unendo interessi pratici a interessi teorici, in un modo che è molto caratteristico del personaggio Galilei e della scienza moderna. Egli scrive: *"Quanti e quali siano i vantaggi di questo strumento così per Terra come per mare, sarebbe del tutto superfluo enumerare. Ma io lasciando le cose terrene mi rivolsi alla speculazione delle celesti; e prima mirai la Luna così da vicino, come se fosse distante due semidiametri terrestri. Dopo questa osservai più volte con incredibile godimento dell'animo le stelle, tanto fisse che erranti"*

Galilei descrive le sue osservazioni nel *Sidereus Nuncius*, (un avviso celeste) la sua prima importante opera scientifica, pubblicata all'inizio del 1610, quando aveva 46 anni. Anche se nella dedica introduttiva si ravvisa una certa retorica e qualche accenno astrologico, il *Sidereus Nuncius* è ancor oggi un'opera di estrema lucidità, chiarezza e modernità sotto il punto di vista della comunicazione scientifica. Nel periodo tra il 7 gennaio e il 3 marzo del 1610, Galilei, servendosi del suo cannocchiale, fece diverse scoperte di notevole importanza. Dapprima puntò lo strumento sulla Luna, ricavandone la seguente descrizione: *"La superficie della Luna non è affatto liscia, uniforme e di sfericità esatissima, come di essa Luna e degli altri corpi celesti una numerosa schiera di filosofi ha ritenuto, ma al contrario, disuguale scabra, ripiena di cavità e sporgenze, non altrimenti che la faccia stessa della Terra, la quale si differenzia qua per catene di monti là per profondità di valli"*.

Galilei non si limitò a riferire ciò che aveva visto, del tutto in contrasto all'idea aristotelica della perfezione dei cieli, ma, a sostegno del fatto che la Luna fosse scabra, portò molti altri elementi, tra cui misure precise. Per esempio, mise a punto un metodo per determinare l'altezza delle montagne lunari in base alle ombre proiettate sulla superficie. Le misure ottenute per l'altezza di alcune montagne non differiscono di molto dai valori moderni. Alcune argomentazioni addotte contro le nuove scoperte erano così sciocche che ci risulta difficile considerarle seriamente. Un avversario di Galilei, pur ammettendo che la superficie della Luna appariva accidentata, sosteneva che in realtà essa era perfettamente liscia e sferica, come aveva detto Aristotele. Egli conciliava le due posizioni affermando che la Luna era ricoperta da un materiale trasparente e perfettamente levigato, attraverso il quale si potevano discernere montagne e crateri situati nell'interno. La risposta di Galilei è tanto breve quanto risoluta ed efficace: *"veramente l'immaginazione è bella... solo gli manca il non esser né dimostrata, né dimostrabile"*. V'è qui un deciso rifiuto di tutte le fantasie pseudoscientifiche, che ci lascia sorpresi per la sua modernità.

Poi Galilei passò a osservare le stelle. Egli si accorse che, mentre a occhio nudo la Via Lattea sembrava una fascia luminosa continua, attraverso il cannocchiale risultava formata da migliaia di stelle debolmente luminose. In qualsiasi parte del cielo puntasse il suo strumento, comparivano molte più stelle di quante se ne potevano vedere a occhio nudo; e ciò era in contraddizione con la vecchia idea che le stelle erano state create per fornire luce, in modo che l'uomo potesse vedere anche di notte. Infatti, ammettendo questo, non vi era ragione che esistessero stelle invisibili a occhio nudo. Galilei, però, ne aveva trovate a migliaia.

Dopo le osservazioni della Luna e delle stelle fisse, egli fece una scoperta che, secondo il suo giudizio, *"supera di gran lunga ogni immaginazione, e che principalmente ci ha spinto a farne avvertiti tutti gli Astronomi e i Filosofi, è l'aver noi appunto scoperto quattro stelle erranti, da nessun altro prima di noi conosciute né osservate"*. Egli, con questo, si riferisce alla scoperta dei quattro maggiori satelliti, Callisto, Europa, Ganimède, Io che orbitano attorno a Giove (a tutt'oggi sono stati scoperti più di 60 satelliti di Giove: un quinto, Amaltea, fu osservato tre secoli dopo ed i restanti nel corso del 900. I raggi variano dai 2600 km di Ganimede ai 1500 di Europa, fino a una decina di km per i più piccoli). Davanti ai suoi occhi stava un Sistema solare in miniatura, in cui era chiaramente individuabile il centro di rivoluzione. È ancor oggi emozionante, così come al tempo di Galilei, osservare per la prima volta al telescopio le lune di Giove: ci si rende immediatamente conto che l'esistenza di questo minuscolo sistema di corpi orbitanti è in aperto contrasto con la concezione aristotelica secondo cui la Terra è al centro di ogni moto che avviene nell'Universo.

La maniera con cui Galilei giunse alla scoperta dei satelliti di Giove rivela le sue doti di osservatore. All'inizio del 1610, ogni notte di bel tempo egli andava scoprendo centinaia di nuove stelle mai viste da occhio umano. La sera del 7 gennaio 1610 puntò il cannocchiale in direzione di Giove, e notò che oltre al pianeta vi erano tre stelle, piccole ma assai luminose. Inizialmente pensò che appartenessero alla moltitudine delle stelle fisse, ma la sua curiosità venne stimolata dal fatto che tali stelle giacevano tutte allineate (come annotò nei suoi schizzi). La notte seguente riuscì di nuovo a rintracciarle, e si avvide che avevano cambiato posizione rispetto a Giove. Per settimane, ogni volta che il tempo era favorevole, continuò a osservare il pianeta e le stelline che gli ruotavano attorno, tracciando schizzi delle loro posizioni reciproche. Nel giro di pochi giorni arrivò alla conclusione che vi erano quattro di queste stelline, e che in effetti potevano essere considerate satelliti di Giove. Poi proseguì nelle sue osservazioni finché non riuscì a determinare il loro periodo di rotazione attorno al pianeta.

Forse il pensiero scientifico moderno nasce in quei giorni, in cui Galilei si accorge di aver individuato corpi celesti mai visti in precedenza. La scoperta di quattro satelliti di Giove fu, tra le scoperte di Galilei, quella che fece maggior sensazione. Il *Sidereus Nuncius* ebbe un successo strepitoso, tutte le copie venivano vendute non appena finite di stampare. Dopo due anni l'opera era arrivata a Mosca e in India e un anno dopo fu riassunta in lingua cinese. A Galilei ne derivò un gran numero di richieste di cannocchiali e una notevole fama personale. Il suo libro, scritto nella lingua internazionale di allora, il latino, divenne per gli scienziati delle epoche successive un manifesto dell'empirismo: privo di speculazioni filosofiche o appelli alle conoscenze degli antichi, conteneva semplicemente la relazione delle sue osservazioni e quindi enunciava un sapere che poteva essere controllato da altri osservatori per divenire intersoggettivo. Prima di passare a descrivere la superficie della Luna, infatti, Galilei specificava che coloro che volessero controllare le sue affermazioni potevano procurarsi uno strumento simile al suo cannocchiale e descriveva un metodo per misurare il potere di ingrandimento di un siffatto strumento ottico. Dopo la pubblicazione del *Nuncius*, Galilei continuò a usare il cannocchiale con notevole successo. Proiettando l'immagine del Sole su uno schermo, egli scoprì le macchie solari. Questa scoperta fu considerata un'ulteriore prova che il Sole, come la Luna, non era un corpo perfetto, nel senso aristotelico della parola: esso aveva delle irregolarità, e non era affatto uniforme e liscio. Dal movimento

ordinato delle macchie solari, dedusse infine, primo nella storia umana, che il Sole non era fermo, ma ruotava anch'esso con un periodo di 27 giorni.

Galilei scoprì anche che Venere presentava diverse fasi, esattamente come la Luna. Perciò, Venere doveva compiere una rotazione completa attorno al Sole, proprio come avevano intuito Copernico e Tycho Brahe, e non poteva certo restare sempre tra il Sole e la Terra, come invece avevano ipotizzato gli astronomi tolemaici. Insomma Galilei raccolse con il cannocchiale una serie impressionante di nuove informazioni riguardanti i cieli, e tutte sembravano in contraddizione con le ipotesi fondamentali dello schema tolemaico del mondo.

Del resto, già nel 1604, osservando una stella *nova* che apparteneva alla sfera delle stelle fisse, Galilei aveva fatto traballare la concezione aristotelica secondo cui gli elementi della sfera delle stelle fisse non potevano mostrare mutamento; successivamente osservò come i corpi celesti fossero corruttibili quanto quelli terrestri; fatti per noi scontati, ma che allora rappresentavano una novità sconvolgente. Tuttavia non furono le osservazioni con il cannocchiale che spinsero Galilei ad accettare il sistema copernicano, poiché egli era già convinto della sua validità; esse contribuirono soltanto a rafforzare tale suo convincimento. Nella sua grande opera intitolata *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, risalente al 1632, egli, più che basarsi sulle osservazioni astronomiche, fondò le sue argomentazioni soprattutto su ipotesi che a lui sembravano evidenti di per se stesse. Galilei, come del resto Tolomeo e Copernico, era consapevole che le sole osservazioni sui moti dei pianeti non erano sufficienti per provare la verità del sistema eliocentrico o di quello geocentrico; anzi, egli affermava che i fenomeni osservati potevano essere descritti correttamente in entrambi gli schemi. In termini moderni le due ipotesi sono *cinematicamente* equivalenti. Ma non per gli aspetti dinamici!

Galilei, tuttavia, accordava la sua fiducia al sistema eliocentrico perché questo gli sembrava più semplice e convincente; inoltre, nel suo pensiero il moto della Terra veniva ad avere una ben precisa realtà fisica. Egli sostenne vigorosamente che il sistema di riferimento preferenziale per studiare i moti del nostro sistema planetario deve essere scelto solidale col Sole, non con la Terra, perché in realtà essa gira attorno al Sole e ruota attorno al proprio asse.

Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Galilei presenta i suoi argomenti con sistematicità, servendosi di uno stile assai vivace. L'opera è scritta in forma di dialogo, come sarà pure per *Le due nuove scienze*, parte in volgare e parte in latino, e in entrambe compaiono gli stessi personaggi: Salviati, Simplicio e Sagredo. Galilei attacca le ipotesi fondamentali del sistema geocentrico, basandosi sulle sue osservazioni sperimentali e su ragionamenti di verosimiglianza, oltre che sugli argomenti presi a prestito da Copernico. A riprova delle sue capacità dialettiche, egli cita Aristotele contro gli stessi aristotelici:

"Ma quello che ho detto io non ha riguardo al Motore, ma solamente i mobili [...]. Avendo dunque riguardo ai mobili, e non si dubitando che operazione più breve e spedita è il muovere la Terra che l'Universo, e di più avendo l'occhio alle tante altre abbreviazioni e agevolezze che questo solo si conseguiscono, un verissimo assioma di Aristotele ci insegna che «Frusta fit per plura quod potest fieri per pauciora» [Salviati traduce di seguito: "Invano si fa con più mezzi quello che si può fare con manco mezzi"] ci rende più probabile il moto diurno esser della Terra sola, che dell'Universo".

Con entusiasmo caratteristico della sua natura, Galilei pensò che le sue scoperte fatte con il cannocchiale avrebbero chiarito a tutti l'assurdità delle prevenzioni che impedivano un'ampia adesione alla teoria copernicana. Ma gli

uomini non credono a ciò che non sono preparati a credere. Nella lotta contro i copernicani, gli aristotelici erano convinti che le loro idee rispecchiassero più da vicino la realtà, e che la teoria eliocentrica fosse manifestamente falsa e in contraddizione sia con il buon senso sia con le osservazioni. Le immagini del cannocchiale avrebbero potuto essere causate da distorsioni: dopo tutto, le lenti alterano veramente il cammino dei raggi di luce. Anche se il cannocchiale sembra dare risultati attendibili per osservazioni terrestri, chi ci garantisce che possiamo concedergli fiducia anche nel caso in cui venga puntato verso oggetti molto più distanti, quali quelli celesti?

Gli aristotelici, inoltre, non avrebbero potuto accettare il sistema copernicano senza rinunciare contemporaneamente a molte delle loro ipotesi fondamentali. Avrebbero dovuto rinunciare a molte idee derivanti dal senso comune, oltre che trovare nuove basi su cui porre le loro dottrine teologiche e morali: l'aristotelismo costituiva infatti una sintesi più o meno felice tra metafisica finalistica ed esperienza del senso comune. Avrebbero dovuto ammettere che la Terra non era al centro del mondo e che l'Universo probabilmente non era stato creato per il genere umano. Per quanto Galilei non osasse suggerire l'infinità del cosmo, l'incredibile numero di stelle mostrato dal cannocchiale era un'indicazione eloquente della insignificanza del nostro pianeta. Possiamo meravigliarci che gli argomenti di Galilei suscitassero tanta avversione? Nell'*Introduzione alla psicoanalisi* (1917) Freud scrive: *"Nel corso del tempo l'umanità ha dovuto sopportare due grandi mortificazioni che la scienza ha recato al suo ingenuo amore di sé. La prima quando apprese che la nostra Terra non è il centro dell'Universo, bensì una minuscola particella di un sistema cosmico che, quanto a grandezza, è difficilmente immaginabile"*

Le osservazioni astronomiche di Galilei affascinarono molte persone, ma non convinsero gli scienziati aristotelici; fra questi, molti avanzavano obiezioni degne di rispetto, ma alcuni si arroccarono su posizioni di stolidità chiusa. Un anno dopo le sue scoperte, Galilei così scrisse a Keplero: *"Che cosa dirai dei primari filosofi di questo ginnasio, che pieni della pertinacia del serpente, mai, per quanto io mi offrissi mille volte di mettermi a loro disposizione, vollero vedere, né i pianeti, né la Luna, né il cannocchiale?"*

## Scienza e fede

*"Se per rimuovere dal mondo questa opinione e dottrina bastasse il serrare la bocca ad un solo, [...] questo sarebbe facilissimo a farsi; ma il negozio cammina altrimenti; perché, per eseguire una tal determinazione, sarebbe necessario proibire non solo il libro del Copernico e gli scritti degli altri autori che seguono l'istessa dottrina, ma bisognerebbe interdire tutta la scienza d'astronomia intiera, e più, vietar a gli uomini guardare verso il cielo" (lettera a Cristina di Lorena, 1615)*

Galilei aveva coltivato un programma ambizioso: voleva che gli uomini guardassero verso il cielo, ossia voleva diffondere tra strati sempre più larghi della popolazione la teoria copernicana per far sorgere, attraverso di essa, lo spirito scientifico moderno. Egli era ben consapevole della potenza e dell'influenza dell'organismo ecclesiastico in specie nella sfera della cultura. Il suo progetto era di ottenere alla nuova scienza il favore e l'appoggio di tutti i potenti, dai principi alla chiesa. Egli considerava la scienza come un fatto di interesse pubblico: per questo la scienza avrebbe avuto bisogno, per attuare il suo pieno sviluppo, di venire sostenuta dai centri del potere. Era quindi necessario convertire la chiesa alla causa della scienza e impedire una frattura che avrebbe

ritardato lo sviluppo della ricerca scientifica. Come? mostrando la compatibilità della teoria copernicana con il dogma religioso. Nel perseguire questo ottimistico intento, Galilei formula la teoria dei due linguaggi: quello ordinario, impreciso e incoerente, e quello scientifico, rigoroso ed esatto. L'infinita sapienza di Dio, pur conoscendoli perfettamente entrambi, sapeva molto bene, quando dettò le Sacre Scritture, che per farsi comprendere dall'uditorio cui si rivolgeva, avrebbe dovuto usare il linguaggio ordinario, che è quello inteso dall'uomo comune. Gli antichi testi si rivolgevano ad uomini semplici e primitivi, incapaci di comprendere che la realtà poteva essere diversa da come appariva ai loro occhi. Se avessero dubitato di ciò che era scritto sulla natura, come avrebbero potuto poi accogliere con fiducia l'insegnamento morale, che era il vero scopo della Bibbia? Perciò fu scritto che il Sole gira intorno alla Terra, proprio come si vede. Ma la verità è una, ed è rivelata non dalla Scritture, ma dalla ricerca scientifica: *"mi par che nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalle autorità di luoghi delle Scritture, ma dalle sensate esperienze e dalle dimostrazioni necessarie"* afferma Galilei rivolgendosi nel 1615 a Cristina di Lorena, granduchessa di Toscana. Cristina era la madre del granduca Cosimo II dei Medici, cui Galilei dedica la scoperta dei satelliti di Giove, succeduto a Ferdinando I nel 1609. La lettera indirizzata all'allievo Benedetto Castelli del 1613, questa e un'altra a Pietro Dini sempre del 1615 costituiscono le cosiddette *lettere copernicane* scritte al fine di difendere il primato conoscitivo della scienza contro ogni autoritarismo. Le *sensate esperienze* superano le percezioni qualitative e immediate dei sensi e consistono di esperimenti progettati in modo che le risposte della natura siano quantitative e inequivocabili; le *necessarie dimostrazioni*, in contrapposizione alla vana dialettica degli aristotelici, sono i ragionamenti condotti con logica rigorosa, che conducono alla conoscenza vera. Prosegue: *"Ma che quell'istesso Dio che ci ha dotati di sensi, di discorso e d'intelletto, abbia voluto, posponendo l'uso di questi, darci con altro mezzo le notizie che per quelli possiamo conseguire, sì che anco in quelle conclusioni naturali, che o dalle sensate esperienze o dalle necessarie dimostrazioni ci vengono esposte innanzi a gli occhi e all'intelletto, doviamo negare il senso e la ragione, non credo che sia necessario il crederlo"*

Questa argomentazione non convinse le autorità ecclesiastiche. Sembra che Galilei non si sia reso conto che la sua argomentazione riconosceva formalmente pari dignità ai due linguaggi nei rispettivi ambiti, mentre di fatto apriva le porte alla supremazia del metodo scientifico nella ricerca della verità, in ogni campo. L'atteggiamento di Galilei è schiettamente illuminista: l'indagine scientifica conduce alla verità attraverso *"le sensate esperienze e le necessarie dimostrazioni"*. La razionalità, valore cui Galilei fa continuamente riferimento, è un atteggiamento dinamico, un'attività che si esplica nel dubbio, nel dibattito, nella critica: è la molla che spinge ogni uomo ad amare il vero ed a gioire quando riesce a liberarsi dall'errore: *"Quanto ai filosofi, se saranno veri filosofi, cioè amatori del vero, non dovranno irritarsi, ma, conoscendo di aver mal creduto, dovranno ringraziar chi gli mostra la verità"*.

La chiesa restò sorda, non volle essere illuminata, e preferì mantenere immutati i propri dogmi, senza preoccuparsi minimamente della ricerca del vero. Qualche secolo dopo, sarà chiaro ai pensatori dell'Illuminismo che non è possibile conciliare le verità della ragione con quelle della fede.

*Colpirne uno per educarne cento*: è questo il principio seguito dalla chiesa cattolica nella condanna a Galilei. Grazie alla prudente cura con cui sempre condusse i rapporti con le gerarchie ecclesiastiche, la condanna fu mite: Galilei fu obbligato a trascorrere la parte restante della sua vita in isolamento, agli arresti

domiciliari, diremmo oggi, nella sua villa ad Arcetri, presso Firenze. Tuttavia, a seguito di tale condanna la cultura italiana soffrì di un danno irreparabile. Infatti l'Italia cadde, con la proibizione della teoria copernicana, in un periodo di stasi della scienza. Il processo di arricchimento della conoscenza scientifica si spostò negli altri paesi europei e nella neonata America, come testimoniano i nomi degli scienziati illustri posteriori a Galilei. Senza libertà di pensiero la scienza non può fiorire.

I tragici fatti che si riferiscono all'ultimo periodo della vita di Galilei sono stati descritti con abbondanza di particolari in molti libri; in questa sede ci limiteremo a trattarne per sommi capi. Già nel 1616 il Tribunale dell'Inquisizione aveva avvertito Galilei che non doveva presentare, nel suo insegnamento, la teoria copernicana come se fosse rispondente al vero, perché ciò era in contrasto con le Sacre Scritture; la teoria copernicana doveva invece essere presentata solamente come uno dei mezzi con cui si potevano prevedere le posizioni dei pianeti. Risale allo stesso periodo la decisione del Tribunale dell'Inquisizione di mettere all'Indice il libro di Copernico, il *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, e di tenervelo fino a quando non fosse stato emendato.

Quando nel 1623 il cardinale Barberini, che era stato in rapporti di stretta amicizia con Galilei, fu eletto papa con il nome di Urbano VIII, Galilei trovò opportuno parlargli del decreto del 1616 contro le idee copernicane da lui professate. Da questo colloquio egli riportò la sensazione che avrebbe potuto nuovamente fidarsi a scrivere su un argomento così scottante. Nel 1632, dopo aver apportato i cambiamenti richiestigli, Galilei riuscì a ottenere l'imprimatur per la pubblicazione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. In questo libro si ritrovano esposti in modo esauriente i punti di vista tolemaico e copernicano, con i loro rispettivi pregi. Dopo la pubblicazione del *Dialogo*, i suoi avversari lo accusarono di non aver tenuto in alcun conto l'avvertimento ricevuto nel 1616.

Occorre considerare che si trattava di un periodo estremamente delicato per la Chiesa cattolica, accusata dai protestanti di corruzione e di infedeltà alle Sacre Scritture: i grandi protagonisti della Riforma erano contrari all'ipotesi copernicana, con veemenza superiore a quella dei cattolici. Nel secolo precedente, il libro di Copernico era stato addirittura dedicato al pontefice Paolo III e non vi erano stati ostacoli alla sua diffusione: ma si trattava di un testo latino, dedicato a una ristretta cerchia di scienziati, che presentava la concezione eliocentrica solo come un'ipotesi interessante. Galilei scriveva anche in italiano per un pubblico più vasto, mettendo in ridicolo le concezioni tradizionali e i loro sostenitori, in un momento in cui la Chiesa cercava di ritrovare la propria unità.

Benché vecchio e sofferente, Galilei fu chiamato a Roma, dove venne tenuto confinato per alcuni mesi. Dagli atti del processo apprendiamo che fu sottoposto a giudizio, minacciato di tortura e costretto a confessare formalmente di aver professato e sostenuto idee contrarie alla religione; egli infine fu costretto ad abiurare la teoria copernicana.

Alla mattina del 22 giugno 1633, nel convento della Minerva in Roma, Galilei (aveva 69 anni all'epoca) inginocchiato davanti ai cardinali inquisitori pronunciò le parole seguenti: "[...] giuro che sempre ho creduto, credo adesso, e con l'aiuto di Dio crederò per l'avvenire, tutto quello che tiene predica e insegna la S. Cattolica e Apostolica Chiesa [...] sono stato giudicato veementemente sospetto d'eresia, cioè d'aver tenuto e creduto che il Sole sia centro del mondo e immobile e che la Terra non sia centro e che si muova [...] dopo d'essermi notificato che detta dottrina è contraria alla Sacra Scrittura"

L'abiura pronunciata da Galilei offre la chiara manifestazione della volontà della chiesa cattolica di stabilire la verità in ambito scientifico ancorandola alla sacralità della Bibbia. Il sottinteso filosofico è chiaro: la scienza non può reggersi da sola, nella ricerca del vero, se non è sostenuta da una solida metafisica. La gerarchia ecclesiastica rinvenne nel metodo galileiano lo stesso pericolo che in esso rinvennero gli aristotelici, sebbene Galilei professasse di attenersi ai canoni metodologici di Aristotele: la pretesa di rompere ogni subordinazione nei confronti di un'antica e ben consolidata metafisica, ricca di dogmi rassicuranti quanto infondati. Anche Aristotele aveva sostenuto la validità dell'osservazione e del ragionamento per la ricerca del vero: ma l'osservazione si limitava agli aspetti qualitativi dei fenomeni ed il ragionamento tendeva alla pura speculazione; per i suoi seguaci, il ragionamento consisteva nel riproporre acriticamente le tesi del maestro, secondo il principio dell'*ipse dixit*.

Inversamente, la maggiore preoccupazione di Galilei fu di aiutare in tutti i modi lo sviluppo della nuova scienza, superando tutti gli ostacoli che le ponevano la metafisica e la teologia. Egli capì che la forza di una teoria scientifica non sta nei suoi principi, che sono affermazioni sempre provvisorie e parziali, ma nel *metodo* che sottopone tali principi a continui controlli, a critiche e a revisioni. Ogni teoria scientifica, per quanto sia consolidata, è suscettibile di revisione alla luce di nuove esperienze. La conoscenza scientifica si caratterizza proprio per essere continuamente rivedibile; paradossalmente la verità scientifica emerge all'interno di una incessante ricerca di ciò che è falso, in quanto una credenza sottoposta a critiche ed a controlli sperimentali ci appare certamente più vicina alla verità di un'altra credenza. La scienza non è in grado di affermare la verità ultima di una teoria. La cosa migliore che può fare è di dire che una certa teoria sembra la migliore disponibile, nel senso che è sopravvissuta ai controlli più severi che siamo stati in grado di escogitare.

Emerge dunque una divergenza radicale tra ragione e fede. Le affermazioni scientifiche sono incomplete e provvisorie, ma vengono elaborate attraverso un metodo critico e democratico. Le verità rivelate dalla fede sono onnicomprensive e definitive, ma si fondano ineluttabilmente sul principio d'autorità: sono dogmi.

Gli amici di Galilei non osarono difenderlo pubblicamente. Il suo libro fu messo all'Indice, dove rimase fino al 1835, seguendo la sorte del libro di Copernico e di uno dei libri di Keplero. La sua umiliazione servì ad ammonire gli uomini che la verità sostenuta dalla fede non deve essere contrastata.

In questi ultimi decenni la chiesa cattolica sembra aver dato il via ad una campagna di riabilitazione dei grandi pensatori che in passato ha colpito con anatema. Ha cominciato da Galilei, visto che la storia e la cultura gli hanno reso da sempre giustizia. Di Galilei la chiesa si è limitata ad accettare le proposizioni strettamente scientifiche, ma non certo il metodo sperimentale fondato sull'uso della ragione critica; né il concetto di una verità mutevole, che si aggiorna nel corso della storia, né il rifiuto di tesi non dimostrate, tutte posizioni in contrasto con la supina accettazione di verità basate sui dogmi della fede. Dunque tale riabilitazione appare meramente formale e corrisponde ad una operazione di propaganda, che infatti ha avuto una notevole risonanza nei mezzi di comunicazione di massa. E' servita per far credere alla gente che Galilei abbia commesso qualcosa di male e che la chiesa cattolica l'abbia perdonato. Purtroppo la posizione della chiesa cattolica nei confronti della cultura scientifica non è cambiata affatto da quella assunta dai tempi di Galilei, e la chiesa cattolica continua non solo a disconoscere la bellezza e la superiorità dei metodi

razionali di indagine del vero, ma li avversa, ribadendo la sua volontà di dominare il sapere umano.

Il pontefice della riabilitazione, Giovanni Paolo II, scrisse: *"la maggior parte dei teologi [che condannarono Galilei] trasposero indebitamente nel campo della dottrina della fede una questione di fatto appartenente alla ricerca scientifica"* (31 ottobre 1992) Ma chi decide che cosa fa parte della ricerca scientifica e che cosa non ne fa parte? Ovvero, chi decide come deve essere indirizzata, controllata o limitata la ricerca scientifica? Ciò che la chiesa cattolica ha fatto contro Galilei continua a farlo ogni giorno, lanciando scomuniche contro la fecondazione assistita, condannando la ricerca sulle staminali embrionali, arrogandosi il diritto di definire che cosa è la vita e di indicare, di conseguenza, come deve essere gestito l'embrione, il feto o un adulto in condizioni di incoscienza.

Dall'epoca di Galilei ad oggi, le applicazioni delle conoscenze scientifiche, unitamente allo sviluppo della democrazia collegato alla lotta contro l'autoritarismo, che dal campo della conoscenza si è estesa al campo politico e sociale, hanno migliorato in modo straordinario le condizioni di vita degli esseri umani; tutto ciò indica che il metodo scientifico ha permesso di elaborare teorie che nel loro complesso sono la migliore descrizione della realtà che l'umanità abbia mai elaborato nel corso della sua storia.

## **Bibliografia**

*Progetto Fisica del PSSC*, vol. A, Zanichelli, Bologna  
*Galileo Galilei*, L. Geymonat, Einaudi, Torino  
*Parola di Galileo*, Frova e Marenzana, Bur, Milano  
*Oroscopi e cannocchiali*, A. Albini, Avverbi, Roma