

Il metodo della scienza moderna

di Cristian Mazzoni

Francis Bacon, italianizzato Bacone (1561, Londra - 1625. Opere principali: *Novum Organon* e *La Nuova Atlantide*. Il *Novum Organon* nel nome echeggia l'*Organon* aristotelico: in effetti esso vuole essere un nuovo “strumento” per la moderna scienza contrapposto al “vecchio” strumento fornito dalla Logica aristotelica)

- 1) Critica del principio d'autorità: la verità non è figlia dell'autorità, ma *filia temporis* (il che vale a dire che, con l'avanzare degli anni, ci si avvicina sempre maggiormente alla verità, ossia che i moderni sono più prossimi alla verità degli antichi).
- 2) Rivalutazione dell'esperienza sensibile: solo attraverso l'esperienza, seppur organizzata e rigorosamente controllata, è possibile accedere alla conoscenza.
- 3) Finalità pratica del conoscere. La conoscenza non è fine a se stessa, come voleva Aristotele, ma è finalizzata a piegare la natura per scopi umani. In questo senso la scienza è finalizzata alla tecnica.
- 4) La verità di una teoria si giudica dai suoi effetti (dal suo successo operativo). Ad esempio, posto come oggetto d'indagine il calore, una teoria sarà giudicata vera se consentirà di produrre artificialmente calore. Col tempo il successo operativo sarà sostituito dalla più generale verifica sperimentale: una teoria sarà accolta a condizione che consenta di prevedere fatti nuovi (vedi più sotto: *Galileo*).

Circa la 2).

Bacone ha cura di evidenziare come l'esperienza è sempre condizionata da taluni pre-concetti che, per così dire, la filtrano, e da cui occorre liberarsi per attingere alla sua purezza, al puro dato esperienziale. Tali pre-concetti sono detti “idola” e si dividono in categorie: idoli della tribù, della spelonca, del foro e del teatro. Gli **idoli della tribù** caratterizzano la specie umana in quanto tale: ad esempio, secondo Bacone v'è, nell'uomo, una tendenza intrinseca a supporre nella natura, a-prioristicamente ed a prescindere da ogni dato osservativo, un'omogeneità e una simmetria che spesso in essa non v'è. Così un pregiudizio diffuso è la concezione per la quale il moto degli astri debba essere circolare, essendo il cerchio segno della perfezione: da questo originario pregiudizio sono sorte concezioni astronomiche (ad esempio il sistema tolemaico), rese estremamente complesse dalla necessità di far fronte a dati osservativi assolutamente contrari. Cito *Novum Organon, Critica della ragione naturale, 25*:

Così, l'intelletto umano, quando trova qualche nozione che lo soddisfa, o perché ritenuta vera, o perché avvincente e piacevole, conduce tutto il resto a corrispondere e coincidere con essa. Anche se la forza e il numero delle istanze contrarie è maggiore, le respinge tutte con disprezzo, oppure cerca di confonderle con frivole distinzioni, non senza grave e dannoso pregiudizio, pur di conservare l'indisturbata autorità delle sue prime affermazioni.

Un altro pre-giudizio (il più difficile da estirpare) è dato dalla fiducia che ciascuno di noi attribuisce ai propri sensi (*Novum Organon, Critica della ragione naturale, 27*): ciascuno, infatti, è portato a ritenere che esista ciò che egli vede, sente, tocca, etc., e non esista ciò che cade al di fuori delle sue possibilità di sensazione. Spesso, tuttavia, ciò che vediamo non ha un corrispettivo reale, ma è un prodotto soggettivo della sensazione.

Gli **idoli della spelonca** non riguardano la specie, ma i singoli individui, e variano dall'uno all'altro: così, qualcuno è più portato, nell'esperienza, a focalizzare l'attenzione sulle differenze fra oggetti o eventi, altri sulle somiglianze, qualcuno, per principio, attribuisce un'autorità indiscussa agli Antichi, altri, ugualmente per principio, parteggiano per ogni novità (*Novum Organon, Critica della ragione naturale, 29*), etc.

Gli **idoli del foro** provengono all'uomo insieme col linguaggio; vale a dire: egli li possiede *in*

quanto possiede un linguaggio. Di essi, in *Novum Organon, Critica della ragione naturale*, 30, si dice:

Gli idoli che penetrano nell'intelletto per mezzo delle parole sono di due specie: o sono nomi di cose inesistenti (come vi sono cose che mancano di nome poiché non ancora cadute sotto l'osservazione, così vi sono nomi di cose inesistenti perché prodotte dalla fantasia e supposte reali); o sono nomi di cose che esistono, ma confusi e indeterminati e impropriamente astratti dalle cose.

Circa gli **idoli del teatro**, in *Novum Organon, Critica della ragione naturale*, 23, si legge:

Altri idoli sono penetrati nell'animo umano ad opera delle diverse dottrine filosofiche ed a causa delle pessime regole di dimostrazione: noi li abbiamo chiamati idoli del teatro, perché tutti i sistemi filosofici che finora sono stati escogitati sono come altrettante favole preparate per essere rappresentate su una scena, buone tutt'al più per costruire mondi di finzioni e di fantasie irreali.

Esiste altresì un **metodo**, articolato per fasi successive, in virtù del quale l'esperienza deve essere indagata. Il fine dell'indagine è l'accertamento della forma di una certa natura, ossia della legge (forma) che presiede ad una certa manifestazione fenomenica (natura). La forma è anche ciò che la cosa è in sé, in rapporto a ciò che è per noi: così il calore (natura), oggetto della nostra percezione (per noi), in sé è un movimento impercettibile di particelle (forma). La forma del calore è anche la legge che presiede al suo manifestarsi fenomenico: così percepiremo calore ogni qualvolta si produrrà movimento di particelle, etc.

L'indagine finalizzata alla ricerca della forma è chiamata da Bacone "induzione" e si svolge secondo i seguenti gradi successivi.

- 1) **Osservazione e classificazione.** L'esperienza deve essere minuziosamente osservata e catalogata in forma scritta prima di giungere a conclusioni universali. Non basta, perciò, la semplice osservazione: deve seguire una rigorosa catalogazione del dato osservativo, cioè una sua organizzazione secondo determinati criteri. Senza una rigorosa organizzazione del dato d'esperienza, esso risulta del tutto inutilizzabile ai fini dell'indagine. Così, se vogliamo spiegare la causa dello sviluppo del calore in un corpo, bisognerà innanzitutto: 1) raggruppare tutti i casi in cui il calore è riscontrato (*tabula presentiae*); 2) raggruppare tutti i casi simili ai precedenti nei quali non è evidenziata presenza di calore (*tabula absentiae*); 3) raggruppare i casi di presenza del calore in differente grado (*tabula graduum*): ad esempio un animale in movimento è più caldo di uno fermo.
- 2) Raccolti i dati, occorre poi procedere all'**interpretazione** degli stessi. Così, ciò che non è presente in alcuni casi accertati di presenza di calore, non può essere la causa del calore, alla stessa maniera, ciò che si pone in casi di assenza accertata di calore, non può essere assunto come causa del calore. Alla stessa maniera, non può essere causa del calore ciò che decresce in casi di aumento di calore o aumenta in casi di diminuzione di calore. Esemplificando, se la mia indagine è volta ad individuare, fra il gruppo di fattori a, b, c, d, la causa del fenomeno x, e se nella tavola di presenza risultano le combinazioni a, c, d / a, c, b / a, c, b, d / a, c; nella tavola di assenza le combinazioni a, b, d / c, b, d / b, d / a, b / a, d / c, b / c, d / a / b / c / d; e in quella di grado risultano le combinazioni a, c, d / a, c, b / a, c, b, d / a, c; ne concluderemo (in via ipotetica) che la causa del fenomeno x non è uno solo dei fattori considerati, ma la loro combinazione. In particolare, si concluderà che la probabile causa del fenomeno è la combinazione a, c. Infatti, tale combinazione risulta in ogni caso di presenza accertata (tavola presenza) e in ogni caso di mutamento di grado (tavola di grado), mentre entrambi i fattori rientrano nella tavola di assenza, sia da soli, sia ciascuno di essi combinato con b e/o d.

- 3) Si è ora in grado di avanzare una prima **ipotesi** circa la causa del calore: ad esempio si dirà che il movimento è causa del calore, essendo presente calore in presenza di movimento ed assente in caso di assenza di movimento ed aumentando e diminuendo il calore all'aumentare o al diminuire del movimento. In particolare si porrà la causa del calore in un certo tipo ben determinato di movimento delle particelle. Tale ipotesi sarà poi soggetta ad un vaglio più rigoroso mediante ausili tecnici che rafforzano (telescopi), ampliano (microscopi) o rettificano (strumenti per la misurazione rigorosa) il dato immediato del senso, o, nel caso di ipotesi contrapposte, mediante esperimenti che consentano di decidere quale fra le due sia da rigettarsi.
- 4) L'ultima fase non è teorica ma pratica o operativa (**pragmatica**). Accertata in via d'ipotesi la forma di una natura oggetto d'indagine (le legge che presiede alla manifestazione del fenomeno o, detto altrimenti, il modo in cui la natura produce il fenomeno), si tratterà di riprodurre artificialmente l'opera della natura, ossia, nel nostro esempio, si tratterà di produrre nell'oggetto quel certo movimento delle particelle, in modo da verificare il prodursi o meno nel corpo del calore: laddove il calore dovesse prodursi, l'ipotesi risulterà verificata.

Il fine della conoscenza è esattamente la riproduzione e la correzione dell'opera della natura: soltanto conoscendo l'operato naturale, possiamo controllarlo e modificarlo per i nostri fini. Nel *Novum Organon*, si legge:

La scienza e la potenza umana coincidono, perché l'ignoranza della causa preclude l'effetto, ed alla natura si comanda solo ubbidendole: quello che nella teoria fa da causa, nella operazione pratica diviene regola.

GALILEO (1564, Pisa -1642)

La critica è articolata sui seguenti punti:

- 1) Critica del *principio d'autorità*, cioè al ricorso all'autorità di un autore antico (in genere Aristotele o le Sacre Scritture) per dirimere controversie scientifiche. Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, ironizzando circa la posizione dei Peripatetici (ossia dei seguaci di Aristotele), rappresentata da Simplicio, Salviati, sostenitore del copernicanesimo, domanda a quest'ultimo: Or ditemi, signor Simplicio: quando Aristotele si trovasse costretto da evidentissime esperienze a permutar in parte questa sua disposizione ed ordine dell'universo, ed a confessar d'essersi ingannato in una di queste due proposizioni, cioè o nel porre la terra nel centro, o nel voler dire che le sfere celesti si muovessero intorno a total centro, qual delle due confessioni credete che egli eleggesse? Volendo Simplicio, nella risposta, appellarsi al parere peripatetico, Salviati lo incalza: Non domando de i Peripatetici, domando d'Aristotele medesimo; ché quanto a quelli so benissimo ciò che risponderebbero. Essi, come reverentissimi ed umilissimi mancipii di Aristotele, negherebbero tutte l'esperienze e tutte l'osservazioni del mondo, e ricuserebbero anco di vederle, per non le avere a confessare, e direbbero che il mondo sta come scrisse Aristotele, e non come vuol la natura: perché, togligli l'appoggio di quell'autorità, con che vorreste che comparissero in campo? E però ditemi pure quel che voi stimiate che fusse per far Aristotele medesimo. Ciò che qui, esprimendo la posizione galileiana, rimprovera agli Aristotelici Sagredo, è l'appellarsi nei loro argomenti al testo aristotelico piuttosto che all'evidenza dell'esperienza. Tuttavia, posto per assurdo Aristotele stesso nella loro condizione, a chi potrebbe appellarsi costui? Non certo alla sua stessa autorità. E' quindi probabile che egli, dinnanzi ad evidenze empiriche contrarie, rivedrebbe la propria tesi (almeno in parte), cosa che i suo seguaci non fanno, potendosi ancora riferire, in ultima istanza (cioè esauriti tutti gli argomenti razionali ed esperienziali), all'autorità del maestro.

- 2) Critica all'*antropocentrismo finalistico*, ossia alla concezione per la quale il cosmo intero sarebbe finalizzato al bene dell'uomo.
- 3) Critica alla separazione aristotelica fra matematica e fisica.

In positivo nel pensiero galileiano:

- 1) E' recuperato il valore del dato d'esperienza. Tuttavia esso (quella che Galileo chiama la "sensata esperienza", cioè, letteralmente, l'esperienza dei sensi) non coincide col puro e semplice dato sensoriale quale si dà immediatamente, ma in tale dato *filtrato e controllato dalla ragione*. E' ammesso, quindi il ricorso a strumenti (telescopio, ed es.) che correggano o perfezionino il dato sensoriale immediato, così come si astrae da tutti gli aspetti soggettivi (che variano da soggetto a soggetto) e non rigorosamente quantificabili dell'esperienza: l'esperienza, in definitiva, è ridotta a forme (misurabili) e movimenti (misurabili mediante tempo e spazio). Nel *Saggiatore* (1624) è avanzata la distinzione fra qualità primarie (inerenti le cose), cioè figura, grandezza, numero, posizione nel tempo e nello spazio, e qualità secondarie (non inerenti le cose in se stesse, ma determinate dall'incontro dell'oggetto con gli organi di senso e, dunque, condizionate dalla particolare struttura fisica del soggetto), cioè colori, odori e sapori.
- 2) Posti determinati dati d'esperienza (accertati nel modo di cui sopra), si tratterà di individuare in via ipotetica una teoria (ossia un modello matematico) 1) in grado di render conto dei fenomeni osservati (dedotti come conseguenze dai principi generali della teoria assunti in via ipotetica: per questo si parla di metodo "ipotetico-deduttivo"), 2) in grado di prevedere fenomeni *nuovi*. Si noti: non è sufficiente, per accettare una teoria, che essa spieghi fatti noti, ma deve consentire di *prevederne di nuovi* (ossia dalla teoria devono essere deducibili non soltanto i fatti noti, ma fatti ulteriori, non ancora noti e suscettibili di verifica). Il fatto che i fatti nuovi previsti da una teoria siano verificati, implica l'accettazione della teoria. Galilei, in una prima fase del suo pensiero, sembra ritenere che la verifica sperimentale di una teoria sia sufficiente per concludere la sua verità, in seguito parlerà non più di verità, ma di verosimiglianza. Oggi in genere si parla di *validità* di una teoria scientifica, non di sua verità. Si noti ancora: Galileo, in tutto ciò, assume il principio dell'uniformità della natura, secondo il quale la natura si comporterà per il futuro come si è sempre comportata per il passato.
- 3) Il terzo aspetto del metodo galileiano è dato dalla già summenzionata verifica sperimentale di una teoria assunta in via ipotetica. La verifica sperimentale non consiste nella semplice e passiva osservazione del dato naturale (d'esperienza), ma consiste in un'*interrogazione attiva* della natura: per dirla in una formula, dall'esperienza si passa all'*esperimento*. Esempio: per dimostrare l'ipotesi per la quale un grave in caduta libera si muove di moto uniformemente accelerato (a spazi uguali percorsi corrispondono uguali incrementi di velocità), Galilei dovrà prevedere sulla base della teoria assunta in via d'ipotesi la posizione che un grave, fatto cadere da una certa altezza, dovrà assumere in un certo momento: si tratterà poi di verificare empiricamente se in quel certo momento il grave occuperà quella certa posizione. Tuttavia, data la rapidità della caduta, sarà impossibile verificare in natura la cosa. Galileo inventa perciò il piano inclinato, il quale rallenta la caduta del grave, rendendola così misurabile. La situazione ricreata in laboratorio non è, tuttavia, naturale, bensì, appunto, ricreata in laboratorio *ad hoc* di modo da rendere misurabile ciò che in natura non è misurabile: è un esperimento. Tuttavia vale, per Galileo, a verificare una teoria. Un esempio ancora più illuminante circa la verifica sperimentale intesa in senso galileiano è la dimostrazione di quello che in seguito sarà detto **principio d'inerzia** (la formulazione completa del principio e la sua dimostrazione completa saranno poi svolti da Newton). Ora,

Galilei nota come un palla da biliardo di bronzo cui è impresso un movimento iniziale su un piano orizzontale, tende a mantenere il moto che le è impresso (la stessa velocità) quanto più il piano è levigato e gli attriti sono smorzati. Ciò gli fa supporre che, eliminato ogni attrito (compreso quello dell'aria), il corpo perseveri infinitamente nel proprio moto, ossia gli fa supporre che un corpo che si muove, lasciato a se stesso (vale a dire: in assenza di forze esterne che su di esso agiscano), persevera indefinitamente nel proprio moto uniforme. E' qui evidente come la dimostrazione del principio non sia prettamente empirica, giacché empiricamente è impossibile eliminare ogni attrito: tuttavia mentalmente io posso completare l'esperienza e giungere così alla dimostrazione del principio. Ora, se naturalmente il moto è uniforme (è quanto sostiene il principio così dimostrato), segue che ogni accelerazione o decelerazione richiede l'intervento di un agente esterno (forza).

CARTESIO

Cartesio afferma nei *Principi della Filosofia* (1644) che tutta la fisica è deducibile a partire da principi conoscibili rigorosamente *a priori* in quanto evidenti o deducibili da principi metafisici. Ora, questo negherebbe la necessità del ricorso all'esperienza per spiegare i fenomeni del mondo, i quali sarebbero tutti deducibili *a priori*. In verità Cartesio non nega la necessità del ricorso all'esperienza. Infatti, stanti tali principi, dato il loro carattere d'assoluta generalità, infiniti fenomeni sarebbero con essi compatibili. Occorre osservare attraverso l'esperienza quali di tali infiniti fenomeni possibili siano reali, così come è del tutto necessario formulare ipotesi per spiegare i fenomeni osservati. L'osservazione deve essere condotta secondo le linee-guida tratteggiate da Galileo (fare astrazione dagli aspetti qualitativi dei fenomeni, concentrandosi su quelli quantitativi e, come tali, misurabili, etc.). Similare è anche l'impostazione ipotetico-deduttiva delle teorie esplicative dei singoli fenomeni naturali osservati, così come l'affermata necessità della previsione di fenomeni *nuovi*. Ciò che distingue Cartesio da Galileo è il vincolo che il primo impone alle possibilità stesse delle ipotesi esplicative ("esplicative" rispetto ai singoli fenomeni osservati) formulabili: infatti nessuna di tali ipotesi deve contravvenire i principi generali *a priori*.

I tre principi generali di per sé evidenti o, comunque, derivati da principi metafisici sono:

- 1) Ciascuna cosa, per quanto è in sé, persevera sempre nel proprio stato; e così ciò che si muove una volta, continua a muoversi sempre. Il che vale a dire che ciò che è in quiete rimane in quiete, salvo l'azione di un agente esterno; lo stesso dicasi per ciò che si muove.
- 2) Ogni movimento di per se stesso è retto (rettilineo); e dunque quelle cose che si muovono circolarmente tendono sempre ad allontanarsi dal centro del circolo che descrivono.
- 3) Un corpo, incontrandone un altro più forte, non perde nulla del suo movimento; incontrandone uno meno forte, ne perde quanto ne trasferisce a quello.

GALILEO AUTORE

Galileo fu scienziato (è considerato il padre della “fisica matematica”, cosiddetta in quanto contrapposta alla fisica aristotelica) e filosofo (oggi diremmo un “filosofo della scienza”).

Difesa del copernicanesimo.

Come scienziato fu uno strenuo difensore del copernicanesimo - osservazioni da lui condotte al cannocchiale confermavano con ulteriori dati empirici (non noti a Copernico) la tesi copernicana: anche Giove (non solo la Terra) ha satelliti (gli astri medicei), la superficie lunare presenta delle irregolarità (valli, affossamenti), il Sole presenta macchie in movimento. Ciò non fa che minare l'ipotesi di un'assoluta eterogeneità fra la Terra e tutti gli altri pianeti (*il cielo*, come dicevano gli Antichi). I risultati delle osservazioni galileiane sono riportati nel *Sidereus Nuncius* (1610) e nell'*Istoria delle macchie solari e loro accidenti* (1613).

In quanto difensore del copernicanesimo dovette intraprendere una strenua battaglia contro il dogmatismo ecclesiastico: a questo proposito, nelle *Lettere Copernicane* (1613 – 1616), avanzò la tesi circa la necessità di liberare l'impresa scientifica da ogni condizionamento che non fosse il dato d'esperienza (autonomia della scienza). Ad esempio, sarebbe del tutto scorretto preferire (ciò che accadeva di fatto) una teoria scientifica ad un'altra non sulla base di risultanze sperimentali, ma unicamente in ragione della conformità al Testo Sacro (nel libro di Giosuè l'eroe invita il Sole a *fermarsi* perché egli possa condurre a termine vittoriosamente la battaglia: da ciò si evincerebbe che il Sole si muove). Del resto, il Testo Sacro si rivolgeva ad un'umanità ancora rozza, alla quale occorreva parlare per metafore (le uniche che erano in grado di intendere), sicché non ha da attribuirsi una validità scientifica a quanto ivi affermato. Galileo sostiene esplicitamente che i passi delle Scritture che si riferiscono alla conoscenza fisica non vanno assunti in senso letterale, ma metaforico. Nel 1616 un decreto della Chiesa, comunicato personalmente a Galilei dal cardinale gesuita Bellarmino (per quanto non a lui indirizzato personalmente), condannava le tesi copernicane e vietava a chiunque di professarle. Galilei, dopo aver osservato il divieto per un lungo arco di tempo, nel 1630 conclude il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, nel quale l'adesione al copernicanesimo è celata dietro l'apparente raffronto dialogico fra le due tesi (copernicana e tolemaica). Dopo un iniziale nulla osta da parte della Chiesa alla pubblicazione, il testo viene posto sotto sequestro ed è ingiunto a Galilei di presentarsi dinanzi al Sant'Uffizio a Roma con l'imputazione di aver sostenuto le tesi eliocentriche nonostante il divieto del 1616. Segue la condanna di Galileo al carcere a vita (poi commutato negli arresti domiciliari) e la sua abiura delle tesi copernicane (1633). Morirà nel 1642.

La fisica galileiana come sostegno teorico alle teorie eliocentriche.

Il copernicanesimo sostiene: 1) la Terra ruota ogni giorno su se stessa con movimento da ovest ad est; 2) la Terra ruota intorno al Sole.

Obiezioni immediate alla rotazione della Terra su se stessa sono queste: se la Terra ruota su se stessa, lasciando cadere un grave dall'apice di una torre, questo dovrebbe cadere ad ovest rispetto alla torre, muovendosi la Terra verso est, così come, per lo stesso motivo, sparato un colpo di cannone verso un bersaglio, il colpo dovrebbe non colpire il bersaglio, ma colpire ad ovest del bersaglio, muovendosi la Terra col bersaglio solidale con essa (è posato per terra) verso est; o, ancora, sparato un colpo parallelamente al suolo verso est ed un altro verso ovest, quello verso ovest dovrebbe cadere ad una distanza dal tiratore maggiore rispetto a quello sparato ad est, assommandosi alla distanza percorsa dal proiettile in direzione ovest lo spostamento che nel frattempo ha compiuto il tiratore solidale col suolo verso est, distanza che, invece, si va a detrarre nel caso del colpo sparato ad est. Si aggiunga il caso di un colpo sparato in aria, che dovrebbe

ricadere spostato ad ovest rispetto al tiratore, essendosi quest'ultimo, in quanto solidale al suolo, spostato nel frattempo verso est, etc.

Galilei risponde a queste obiezioni secondo il principio della composizione del moto. Esso presuppone il principio d'inerzia (o di conservazione del movimento), per il quale ogni corpo, cui sia stato impresso un movimento in una certa direzione, conserva la velocità e la direzione del moto che gli è stato impresso (**1**), salvo l'azione di agenti esterni che alterino tale moto (come l'opposizione dell'aria, etc.). Detto ciò, data un certo moto iniziale, a tale moto se ne possono aggiungere di successivi che non annullano il primo, ma semplicemente si *combinano* con tale moto originario.

Così, supponiamo un grave posato sulla sommità dell'albero di una nave in movimento orizzontale: esso condivide con la nave, ovviamente, il movimento orizzontale (infatti si sposta assieme alla nave e nella stessa direzione di questa). Supponiamo ora di farlo cadere. A questo punto, al movimento orizzontale (o di traslazione), che esso condivideva con la nave, se ne aggiunge un altro, ossia quello diretto verso il centro della terra. Il risultato è che il primo movimento (orizzontale) non è annullato dall'altro (verticale), ma si somma ad esso: il grave, cioè, si muove sulla risultante dei due moti.

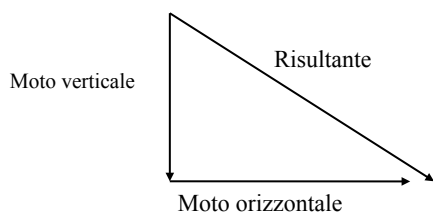


figura 1

Altro argomento utilizzato per difendere il sistema copernicano è la cosiddetta “relatività del moto”. Supponiamo la solita barca e supponiamo di fare cadere il solito grave dall'albero. In questa ipotesi, un soggetto posto sulla barca non percepirà affatto il moto di traslazione (movimento orizzontale) del grave, ma solo quello verticale (di caduta): infatti tale soggetto *partecipa egli stesso con la barca* del moto di traslazione che, dunque, dal suo punto d'osservazione, viene annullato. La cosa si porrebbe altrimenti se supponessimo un soggetto esterno alla barca e tale da non partecipare del moto traslazionale. In tale ipotesi, costui vedrebbe il grave (sempre che avesse sensi accuratamente sviluppati – cosa impossibile per qualsiasi soggetto umano) cadere non verticalmente, ma in diagonale, secondo la risultante dei due moti (quello verticale verso il centro della Terra e quello orizzontale della nave).

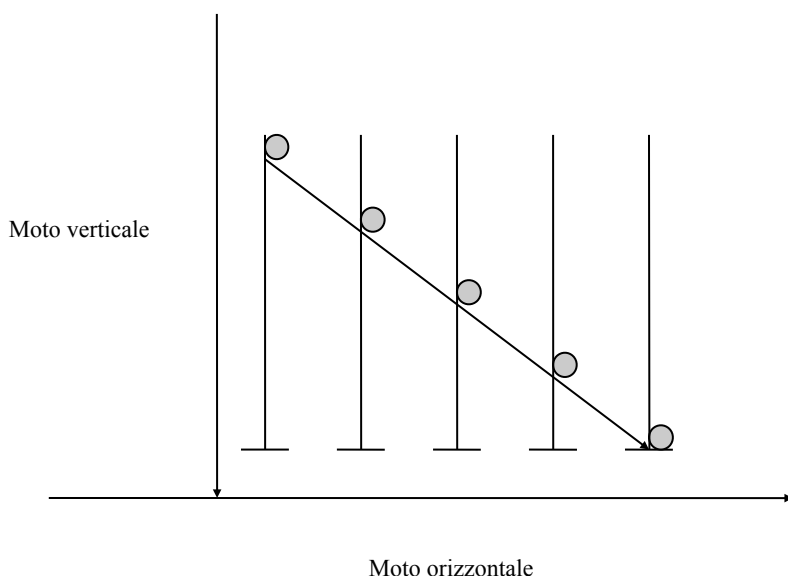


Figura 2

In generale questo vale a dimostrare che, entro un sistema chiuso seppure in movimento, quale la nave ipotizzata, non è possibile avvedersi del moto traslazionale del sistema stesso. Questo vale, ovviamente e a maggior ragione, anche nel caso del movimento terrestre.

Vale la pena di soffermarsi ulteriormente circa le sopra riportate obiezioni al movimento terrestre e circa la difesa della tesi eliocentrica approntata da Galileo.

Il dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo

Gli argomenti aristotelici contrari al movimento terrestre diurno sul proprio asse, così come la risposta galileiana sono chiaramente esposti nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, giornata seconda. La giornata terza, invece, presenta gli argomenti a favore delle tesi Copernicana rispetto a quella tolemaica. Il *Dialogo*, oltre che un testo assai interessante dal punto di vista teorico, costituisce una vera e propria opera letteraria, grazie alla gradevolezza della sua prosa (sono risapute le velleità letterarie dello stesso Galileo). L'interesse teorico, oltre che nel contenuto, risiede nella modalità d'esposizione, la quale mette a confronto i differenti punti di vista, anche se le tesi copernicane, di cui Salviati è il portavoce, risultano dotate di argomenti più stringenti rispetto a quelle tolemaico-aristoteliche, sostenute da Simplicio (il cui nome evoca la semplicità del suo ingegno) – il terzo personaggio, Sagredo, è colui che, nell'ignoranza delle une, come delle altre, cerca di farsi persuadere dalle ragioni migliori (che gli appariranno quelle eliocentriche).

Ora, gli argomenti contrari al moto della Terra sono così sintetizzati da Salviati:

Per la più gagliarda ragione si produce da tutti quella de' i corpi gravi, che cadendo da alto a basso vengono per una linea retta e perpendicolare alla superficie della Terra; argomenti stimato irrefragabile, che la Terra stia immobile: perché, quando ella avesse la conversione diurna, una torre dalla sommità della quale si lasciasse cadere un sasso, venendo portata dalla vertigine della Terra, nel tempo che il sasso consuma nel suo cadere, scorrerebbe molte centinaia di braccia verso oriente, e per tanto spazio dovrebbe il sasso percuotere a terra lontano dalla radice della torre. Il quale effetto confermano con un'altra esperienza, cioè col lasciar cadere una palla di piombo dalla cima dell'albero di una nave che stia ferma, notando il segno dove ella batte, che è vicino al piè dell'albero; ma se dal medesimo luogo si lascerà cadere la medesima palla, quando la nave cammini, la sua percossa sarà lontana dall'altra per tanto spazio quanto la nave sarà scorsa innanzi nel tempo della caduta del piombo, e per questo non per altro se non perché il movimento naturale della palla posta in sua libertà è per linea retta verso il centro della terra. Fortificasi tal argomento con l'esperienza d'un proietto tirato in alto per grandissima distanza, qual sarebbe una palla cacciata da un'artiglieria drizzata a perpendicolo sopra l'orizzonte, la quale nella salita e nel ritorno consuma tanto tempo, che nel nostro parallelo l'artiglieria e noi insieme saremmo per molte miglia portati dalla Terra verso levante, talché la palla, cadendo, non potrebbe mai tornare appresso al pezzo, ma tanto lontano verso occidente quanto la Terra fosse scorsa avanti.

Aggiungono di più la terza e molto più efficace esperienza, che è: tirandosi con una colubrina una palla di volata verso levante, e poi un'altra con egual carica e alla medesima elevazione verso ponente, il tiro verso ponente riuscirebbe estremamente maggiore dell'altro verso levante; imperocchè mentre la palla va verso occidente, e l'artiglieria, portata dalla Terra, verso oriente, la palla verrebbe a percuotere in terra lontana dall'artiglieria tanto spazio quanto è l'aggregato dei due viaggi, uno fatto da sé verso occidente e l'altro dal pezzo, portata dalla Terra, verso levante; e per l'apposito del viaggio fatto dalla palla tirata verso levante bisognerebbe detrarre quello che avesse fatto l'artiglieria seguendola: posto dunque, per esempio, che il viaggio della palla per se stesso fosse cinque miglia, e che la Terra, in quel tal parallelo, nel tempo della volata della palla, scorresse per tre miglia, nel tiro di ponente la palla cadrebbe in terra otto miglia lontano dal pezzo, cioè le sue cinque verso ponente e le tre del pezzo verso levante; ma il tiro d'oriente non riuscirebbe più lungo di due miglia, ché tanto resta detratto dalle cinque del tiro le tre del moto del pezzo verso la medesima parte: ma l'esperienza mostra i tiri essere uguali; dunque l'artiglieria sta immobile e per conseguenza la Terra ancora.

Posto ciò, risulta indubitabile questo: se l'esperienza dimostrasse che un grave, fatto cadere dall'apice dell'albero di una nave in movimento, cadesse esattamente ai suoi piedi, così come ai suoi piedi cade nel caso di nave ferma, la circostanza che i gravi, fatti cadere da una torre, caschino alla sua base, etc., non sarebbe da considerare prova contraria al moto diurna della Terra: infatti, anche la Terra, in analogia alla nave in movimento, potrebbe muoversi, cadendo i gravi ai piedi della torre al pari che il grave fatto cadere dall'albero della nave cade alla sua base. Domanda Salviati a Simplicio:

Benissimo. Avete voi mai fatta l'esperienza della nave?

Risponde Simplicio:

Non l'ho fatta; ma ben credo che quelli autori che la producono, l'abbiano diligentemente osservata: oltre che si conosce tanto apertamente la causa della disparità, che non lascia luogo di dubitare.

A ciò replica in modo pungente Salviati, riprovando la totale mancanza di verifica empirica delle tesi aristoteliche:

Che possa essere che quelli autori la portino senza averla fatta, voi stesso ne siete buon testimone, che senza averla fatta, la recate per sicura e ve ne rimettete a buona fede al detto loro: sì come è poi non solo possibile, ma necessario, che abbiano fatto essi ancora, dico di rimettersi a i suoi antecessori, senza arrivar mai a uno che l'abbia fatta; perché chiunque la farà, troverà l'esperienza mostrar tutto il contrario di quel che viene scritto: cioè mostrerà che la pietra casca sempre nel medesimo luogo della nave, stia ella ferma o muovasi con qualsivoglia velocità. Onde, per esser la medesima ragione della Terra che della nave, dal cader la pietra sempre a perpendicolo al pie' della torre non si può inferir nulla del moto o della quiete della Terra.

Ora, l'esperienza che il grave cade alla stessa maniera sia a nave ferma, sia con nave in movimento, se da una parte risolve le obiezioni mosse dai critici del copernicanesimo, dall'altra pone la necessità di spiegare la circostanza che segue: il grave cade dall'albero della nave non secondo una linea retta, ma secondo una linea obliqua. Infatti, se cadesse in linea retta, facendo rotta la nave verso est, cadrebbe ad ovest dell'albero, facendo rotta verso nord, cadrebbe a sud dell'albero, etc. Infatti, se cadesse in linea retta, sarebbe:

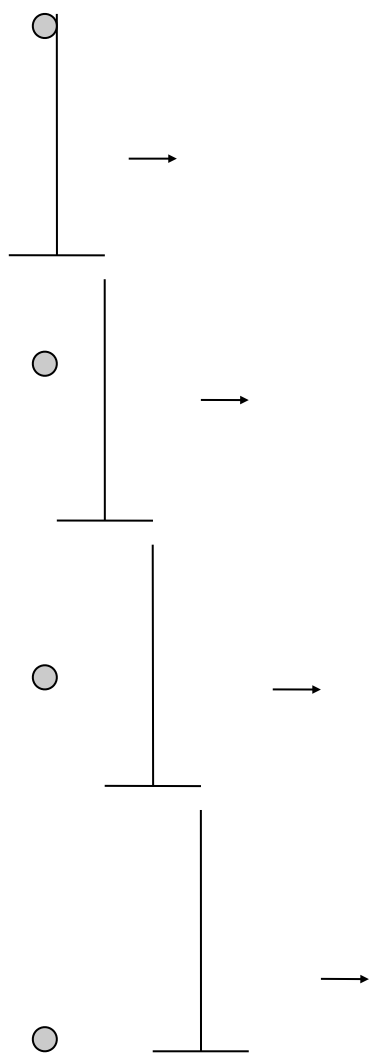


Figura 3

Dunque se è vero, come prova l'esperienza, che il grave cade sempre ai piedi dell'albero, ne segue che esso, cadendo, non solo deve scendere verso il basso, ma, contemporaneamente, spostarsi in orizzontale nella direzione e con la stessa velocità di marcia della nave. Tuttavia, non accadrà che esso scenda in linea retta verso il basso e poi, d'un tratto, proceda parallelo al suolo nella direzione e con la velocità di marcia della nave, per poi cadere nuovamente in linea retta verso il basso, etc.: accadrà invece, secondo la legge di composizione del moto proposta da Galileo, che questi due movimenti si comporranno fra loro in un terzo movimento (cioè la discesa secondo la diagonale – si veda la figura 1 di cui sopra).

Resta da spiegare, tuttavia, quale sia la causa del movimento di traslazione, ossia di quel movimento che, componendosi con quello di caduta verso il centro della Terra, determina lo spostamento secondo la diagonale risultante e, perciò, il fatto che il corpo cada costantemente ai piedi dell'albero della nave. Per spiegare il moto di traslazione, Galileo utilizza il principio d'inerzia. Secondo un tipico esperimento mentale, infatti, egli conclude che un corpo cui sia impresso un moto, mantenga infinitamente la velocità e la direzione del moto che gli è impresso, salvo l'azione di forze contrarie.

Ora, posto che lo conservi poi, da chi riceve il moto il grave posato sulla sommità della nave in marcia?

Questo è quello che domanda Simplicio. Questi, infatti, dopo aver concordato circa la versione generale del principio d'inerzia, per la quale, rimosso ogni impedimento, un corpo posto su una

superficie orizzontale perfettamente levigata cui sia stata impressa una spinta, manterrebbe indefinitamente il movimento ricevuto, domanda: chi imprime, nel caso del grave sull'albero della nave, il moto di traslazione nel verso e secondo la velocità di crociera della nave? Nell'ipotesi presa in esame, infatti, colui che, posto all'apice dell'albero della nave, tiene il grave nella propria mano, si limita a lasciarlo cadere, senza fornirgli alcuna spinta con la forza delle braccia.

La risposta di Galileo è: la nave stessa, attraverso l'albero e, da ultimo, attraverso la mano di chi è sulla sommità dell'albero e che poi lascerà cadere il grave a terra. Quando la mano viene rilasciata e il grave inizia a cadere, sospeso nell'aria, ad esso s'è già trasmesso del movimento secondo una certa velocità e direzione: è, come detto, il moto stesso della nave che, per contatto, s'è trasmesso al grave. Dunque, ora, sospeso nell'aria, il grave si muoverà secondo la risultante di due moti: quello diretto verso il centro della Terra e quello di traslazione che ha ricevuto dalla nave e che esso, per il principio d'inerzia, conserva.

L'argomentazione di Salviati è stringente perché porta Simplicio a contraddizione con se stesso, giacché, se passa il principio che un movimento, dopo che è impresso, si deve mantenere, salvo la forza di agenti contrari, si dovrà pur ammettere che, anche nel caso del grave sulla sommità della nave, su di esso s'è impresso un movimento (infatti, sin tanto che era solidale con la nave, si muoveva assieme ad essa nello stesso verso e con la stessa velocità), e che, perciò, quel movimento si dovrà mantenere anche allorché ne è separato.

Cito il testo:

Simplicio:

Io non mi sento rimossi tutti gli scrupoli; e forse il difetto è mio, per non essere di così facile e veloce apprensiva come il signor Sagredo. E parmi che quando questo moto partecipato della pietra, mentre era su l'albero della nave, s'avesse, come voi dite, a conservar indelebilmente in lei, dopo ancora che si trova separata dalla nave, bisognerebbe che similmente quando alcuno, sendo sopra un cavallo che corresse velocemente, si lasciasse cader di mano una palla, quella, caduta in terra, continuasse il suo moto e seguitasse il corso del cavallo senza restargli a dietro: il quale effetto non credo io che si vegga, se non quando colui ch'è sul cavallo la gettasse con forza verso la parte del corso; ma senza questo, credo ch'ella resterà in terra dov'ella percuote.

Salviati:

Io credo che voi v'inganniate d'assai, e son sicuro che l'esperienza vi mostrerà il contrario, e che la palla, arrivata che sia in terra, correrà insieme col cavallo, né gli resterà indietro, se non quanto l'asprezza ed inegualità della strada l'impedirà: e la ragione mi par pure assai chiara. Imperocchè, quando voi, stando fermo, tiraste per terra la medesima palla, non continuerebbe ella il moto anco fuor della vostra mano? E per tanto più lungo intervallo, quanto la superficie fusse più eguale, sì che, verbigravia, sopra il ghiaccio andrebbe lontanissima?

Simplicio:

Questo non ha dubbio, quando io gli do impeto col braccio; ma nell'altro caso si suppone che colui che è sul cavallo la lasci solamente cadere.

Salviati:

Così voglio io che segua. Ma quando voi la tirate col braccio, che altro rimane alla palla, uscita che ella vi è di mano, che il moto concepito dal vostro braccio, il quale, in lei conservato, continua di condurla innanzi? Ora, che importa che quell'impeto sia conferito alla palla più dal vostro braccio che dal cavallo? Mentre che voi sete a cavallo non corre la vostra mano, ed in conseguenza la palla, così veloce come il cavallo stesso? Certo sì; dunque, nell'aprir solamente la mano, la palla si parte col moto già concepito non dal vostro braccio per moto vostro particolare, ma dal moto dependente dall'istesso cavallo, che vien comunicato a voi, al braccio, alla mano, e finalmente alla palla.

L'esempio della nave (per il quale il grave fatto cadere dalla sommità del suo albero, ne cade sempre alla base, sia che essa si muova, sia che stia ferma), applicato al supposto movimento terrestre, equivale a dire che la Terra, nel suo moto diurno verso est, trasmette a tutti i corpi ad essa solidali un corrispettivo movimento verso est, che questi ultimi conservano (salvo l'azione di agenti contrari) anche laddove cessi il contatto col suolo.

Lo stesso esempio vale a dimostrare la relatività del moto: infatti chi si trova sulla barca in movimento (o sulla Terra, posto che questa si muova), non percepisce affatto il movimento di traslazione del grave, ma unicamente la caduta secondo la linea retta. Con le parole di Salviati:

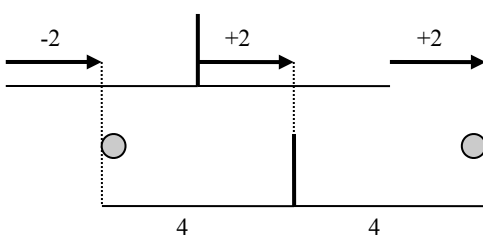
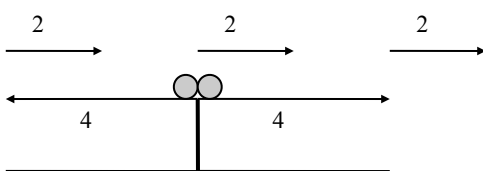
Anzi pur, signora Sagredo, non veggiamo noi altro che il semplice in giù, avvenga che l'altro circolare, comune alla Terra, alla torre e a noi, resta impercettibile e come nullo, e solo ci resta notevole quello della pietra, non partecipato da noi; e di questo il senso dimostra che sia per linea retta, venendo sempre parallelo alla stessa torre, che sopra la superficie terrestre è fabbricata rettamente ed a perpendicolo.

Restano, tuttavia, ancora da confutare gli altri rilievi mossi da Simplicio alla tesi del movimento della Terra intorno al proprio asse.

Uno fra questi consisteva nella già riportata tesi per la quale un colpo sparato verso ovest deve cadere più lontano dal tiratore rispetto a quello stesso colpo sparato verso est, posto che la Terra, appunto, si muova verso est. La risposta di Galileo è facilmente intuibile e ricalca, secondo l'utilizzo che è fatto del principio d'inerzia, quella già proposta nel caso della grave fatto cadere dalla sommità della torre.

Infatti, alla velocità impressa al proiettile sparato verso ovest, si deve detrarre la velocità del movimento della Terra verso est, che s'è comunicata al proiettile quand'era ancora entro la pistola e che questo conserva; mentre quella stessa velocità, per lo stesso motivo, si deve sommare nel caso del colpo sparato verso ovest: così il primo perderà quella stessa velocità che il secondo guadagnerà, con la differenza che il tiratore, solidale col suolo, sarà avanzato con la stessa velocità che l'uno ha perso e l'altro ha guadagnato. Il risultato è che le distanze percorse dai due proiettili sparati in senso contrario, rispetto al tiratore, saranno le medesime. Infatti, se la velocità con cui si muove la Terra è, poniamo, 2 metri al secondo, e la velocità impressa al proiettile è 4 metri al secondo, nel caso del proiettile sparato ad ovest, la sua velocità risultante sarà $4 - 2 = 2$ metri al secondo, nel caso di quello sparato ad ovest, sarà di $4 + 2 = 6$ metri al secondo: quindi, laddove il primo proiettile percorra 2 metri, in quello stesso lasso di tempo l'altro ne avrà percorsi 6. Tuttavia i 2 e i 6 metri sono considerati qui rispetto alla posizione che *prima* (al momento del tiro) occupava il tiratore: egli stesso, infatti, in quello stesso lasso di tempo in cui il proiettile lanciato ad ovest ha percorso 2 metri e quello lanciato ad est 6, si sarà spostato verso est di 2 metri. Il risultato è che, se vogliamo calcolare la distanza percorsa dai due proiettili rispetto alla posizione che *ora* occupa il tiratore, dobbiamo aggiungere ai 2 metri percorsi dal proiettile lanciato ad ovest, gli altri 2 metri percorsi dal lanciatore solidale al suolo ($2 + 2 = 4$), mentre ai sei percorsi dal proiettile lanciato verso est, dobbiamo detrarre quegli stessi 2 metri percorsi dal tiratore solidale al suolo ($6 - 2 = 4$).

Graficamente:



L'esperimento proposto da Galileo per confutare la tesi aristotelica e confermare la propria, è in questo caso il seguente: lanciare con l'arco due frecce, cui sia stato impresso uno stesso impeto, in direzione contraria (l'una verso est e l'altra verso ovest), a partire da una carrozza in corsa verso est. L'esperienza proverà:

Salviati:

Adunque, nello scaricare il bolzone verso il corso della carrozza, l'arco imprime i suoi tre gradi di velocità in un bolzone che ne ha già un grado mercé della carrozza che verso quella parte con tanta velocità lo porta, talché nell'uscir dalla cocca e' si trova con quattro gradi di velocità; ed all'incontro, tirando per l'altro verso, il medesimo arco conferisce i medesimi tre gradi in un bolzone che si muove in contrario con un grado, talché nel separarsi dalla corda non gli restano che altro che dua soli gradi di velocità. Ma già voi stesso avete deposto che per fare i tiri eguali bisogna che il bolzone si parta una volta con quattro gradi e l'altra con due: dunque, senza mutar arco, l'istesso corso della carrozza è quello che aggiusta le partite, e l'esperienza è poi quella che le sigilla a coloro che non volessero o non potessero esser capaci della ragione. Ora applicate questo discorso all'artiglieria e troverete che, muovasi la Terra o stia ferma, i tiri fatti dalla medesima forza hanno a riuscir sempre eguali, verso qualsivoglia parte indirizzati.

Gli argomenti prodotti da Galileo e qui riportati a titolo meramente esemplificativo, si noti, non sono ancora una *prova* a favore del sistema copernicano (in questo caso una prova del moto diurno della Terra sul proprio asse), ma sono soltanto una sua *difesa* da quelli, fra gli attacchi dei suoi detrattori, i quali abbiano una connotazione *razionale* (cioè filosofica) e non teologica: infatti, contro un attacco che muove da basi teologiche (le Sacre Scritture), non può essere prodotta alcuna argomentazione razionale. Gli argomenti a favore della tesi copernicana (eliocentrica) e quelli a detrimento della tolemaica (geocentrica), in riferimento non solo al moto diurno sul proprio asse, ma anche i riferimento a quello annuale intorno al Sole, saranno svolti, come anticipato, nel libro terzo del *Dialogo*. Il lettore li può ritrovare nel capitolo del presente manuale dal titolo "Il cielo antico e moderno": ad essi, i quali, nella sostanza, affermano la *maggior semplicità*, rispetto alla spiegazione dei fatti noti, del modello Copernicano, Galileo ne aggiunge di ulteriori a carattere osservativo. Nello stesso libro terzo, Galileo risponde poi alle obiezioni di Simplicio circa il moto annuo della Terra.

La caduta dei gravi

Mi riferirò ai *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* del 1638.

La tesi che Galileo si trova a controbattere è quella aristotelica rappresentata nel *Dialogo* da Simplicio (i personaggi sono i medesimi del successivo *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*): secondo la concezione aristotelica il vuoto non esiste ed ogni moto si svolge attraverso un mezzo; i corpi pensanti tendono per loro natura a raggiungere il loro luogo naturale, cioè il centro della terra; la velocità di caduta viene a dipendere da due fattori: la densità del mezzo e la pesantezza del grave, di modo che: a parità di mezzo, essa è direttamente proporzionale alla pesantezza del grave (il peso raddoppia e la velocità raddoppia); a parità di pesantezza del grave, è inversamente proporzionale alla densità del mezzo (la densità raddoppia e la velocità dimezza). Tutto ciò sembra confermato dall'esperienza quotidiana. Non appartiene invece alla tradizione aristotelica (come molti manuali erroneamente affermano) la tesi che la velocità di un grave in caduta libera fosse costante, ossia che, per pari intervalli di tempo, esso percorresse pari distanze: così, se nel tempo x esso percorre una distanza z , nel tempo $2x$ ne percorrerà una $2z$, in $3x$ una $3z$, etc. Lo stesso Aristotele, infatti, aveva già riconosciuto che la velocità di caduta di un grave non è

costante ma accelerata, salvo aver lasciato impregiudicata la determinazione dell'accelerazione, problema che nessuno dei suoi epigoni risolse¹.

La tesi di Galileo è invece che la velocità di caduta di un grave non venga a dipendere dal suo peso: oggetti di differente peso toccherebbero terra perciò, se lasciati cadere da una stessa altezza, nello stesso istante, salvo l'attrito del mezzo. La tesi, riformulata in altra maniera, sostiene perciò: nel vuoto, ossia in assenza di attrito determinato dal mezzo, due corpi di differente peso lasciati cadere da una stessa altezza, raggiungono terra nello stesso momento. Altra tesi di Galileo è che la velocità di caduta non è costante, ma uniformemente accelerata. Ciò significa che un grave lasciato cadere, a partire dalla quiete, per pari intervalli di tempo subisce una pari accelerazione. Così, se considero intervalli di tempo qualsiasi x , e se, per l'intervallo iniziale x , il corpo cadendo percorre uno spazio z , nell'intervallo di tempo $2x$ esso acquisterà una velocità doppia di quella che possedeva nel primo intervallo, ossia percorrerà il doppio dello spazio percorso nell'intervallo di tempo x : perciò, se, mantenendo la velocità che aveva nell'intervallo x , in $2x$ avrebbe percorso uno spazio $2z$, raddoppiando la sua velocità nell'intervallo $2x$, ne percorrerà uno pari a $2z \cdot 2 = 4z^2$.

Ora, diviene interessante analizzare come Galileo sostiene le sue tesi. Contro la tesi degli Aristotelici (detti anche Peripatetici) che la velocità di caduta sia in rapporto al peso ed alla densità del mezzo egli adduce dapprima un'argomentazione logica (non perciò sperimentale), la quale, per quanto ingegnosa, non è né chiara nei suoi dettagli, né convincente quanto al fine che si proponeva di conseguire, e in seguito un argomento di natura sperimentale assai più convincente. Quanto alla prima. Posta uguaglianza di mezzo, poniamo questa situazione: "congiungo" (non è chiaro in che senso dobbiamo intendere "congiungere": se come legare assieme, etc., ma noi intendiamo: legare strettamente insieme) ad una pietra di peso x un'altra pietra di peso qualsiasi ma inferiore ad x . Ora, se la velocità di caduta viene ad essere determinata dal peso, la pietra frutto della congiunzione delle due, in quanto più pesante, dovrebbe cadere più rapidamente dell'altra singolarmente presa di peso x , tuttavia, nella congiunzione, l'una delle due pietre, cadendo più lentamente dell'altra più pesante, dovrebbe trattenerla, mentre quella dovrebbe accelerare questa, con l'effetto che il composto in ogni caso cadrà con una velocità minore della pietra di peso maggiore singolarmente presa. La conclusione è che, posto il principio che di due gravi fatti cadere in caduta libera nello stesso mezzo, il più pesante sovrasta il più leggero in velocità quanto lo supera in peso, dallo stesso principio se ne deduce il contrario, ossia che il più leggero tocca terra prima del più pesante: ciò dimostrerebbe la contraddittorietà dell'assunto di partenza³.

¹ "Perchè, se così fosse, una quantità maggiore di fuoco o di terra si muoverebbe più lentamente, rispettivamente, verso l'alto e verso il basso; ora, invece, una quantità maggiore di fuoco, o di terra, si muove più velocemente verso i rispettivi luoghi. E non si muoverebbero più velocemente in prossimità della meta, se il moto fosse provocato da costrizione o espulsione; giacché tutti i corpi rallentano il moto quanto più s'allontanano da ciò che con la violenza ha loro impresso il moto, e donde son mossi per costrizione, ivi si portano quando non c'è costrizione". (Aristotele, *Del cielo*, 8)

² La definizione di moto uniformemente accelerato è contenuta nella *Giornata terza*. "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". Più sopra nella stessa Giornata, esemplificando, si legge: "Cosicchè, considerando un numero qualsiasi di frazioni di tempo eguali a partire dal primo istante in cui il mobile abbandona la quiete e comincia a scendere, il grado di velocità acquistato nella prima e nella seconda frazione di tempo prese insieme, è doppio rispetto al grado di velocità acquistato dal mobile nella prima frazione; e il grado che si ottiene in tre frazioni di tempo, è triplo; quello acquistato in quattro, quadruplo del medesimo grado del primo tempo [...]".

³ L'argomento è riportato nella *Giornata prima*: "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 muoveva con otto gradi di velocità: adunque questa maggiore si muove men velocemente che la minore; che è contro la vostra supposizione. Vedete dunque come dal suppor che 'l mobile più grave si muova più velocemente del men grave, io vi concludo, il più grave muoversi men velocemente".

Passo all'argomento di natura sperimentale. Gli Aristotelici (detti anche Peripatetici) sostengono, s'è visto, che le velocità di caduta di due gravi, a parità di mezzo (ad esempio nell'aria), vengono a dipendere dal loro peso e seguono la proporzione fra i rispettivi pesi: così ciò che pesa il doppio dovrebbe raggiungere terra in un tempo che è la metà, e ciò che pesa la metà dovrebbe toccare terra in un tempo che è il doppio: questa proporzione di caduta, tuttavia, non si osserva, ma i due corpi cadono con uno scarto fra i loro tempi di caduta molto più piccolo. Tale scarto, inoltre, diminuisce sempre di più all'accrescersi della rarità del mezzo (ad esempio nell'aria è minore che nell'acqua e nell'acqua è minore che nell'olio, nell'acqua calda è minore che nella fredda, nell'acqua dolce minore che in quella salata, etc.). E' possibile perciò ipotizzare che, laddove il mezzo fosse assolutamente privo di densità (nel vuoto), gli scarti fra le velocità di caduta di due corpi di differente peso, lasciati cadere dalla stessa altezza, si annullerebbero, ossia raggiungerebbero terra esattamente nello stesso istante. Questa ipotesi, beninteso, Galileo non la verifica sperimentalmente, ma la deduce sulla base delle circostanze sopraddette: che più si rende raro il mezzo, più gli scarti fra le velocità di caduta di due gravi, seppure di differente pesi, diminuiscono⁴.

Quanto alla dimostrazione circa il secondo assunto (un corpo in caduta libera cade di moto uniformemente accelerato), Galileo la svolse a questa maniera. Non potendo misurare la velocità di caduta di un corpo sulla verticale (essa è troppo rapida per poter essere misurata), egli si servì di un piano inclinato quasi parallelo al suolo (il piano era inclinato di dieci gradi e lungo dieci metri), il quale rallentasse la velocità di caduta sino a renderla misurabile. Dopo di che, si servì di una pallina che un suo collaboratore faceva cadere dalla cima del piano mentre lui batteva mentalmente una battuta musicale. Finita la battuta, gli faceva cenno di segnare sul piano il punto in cui si trovava la pallina. In seguito il collaboratore riportava la pallina sulla cima e la rifaceva cadere, mentre Galileo batteva mentalmente due battute musicali, finita la battuta il collaboratore segnava il punto in cui si trovava la pallina, e così via. Dall'esperimento risultò che la velocità di caduta non era una costante, ma vi era accelerazione. Infatti, se al finire della prima battuta la pallina aveva percorso uno spazio x , al finire della seconda non ne aveva percorso uno pari a $2x$, ma uno assai maggiore, che, in seguito, Galileo quantificò alla maniera sopraddetta.

Ora, mettendo assieme i due principi, dovremmo concludere che, se si desse il vuoto, due gravi di peso differente lasciati cadere dalla stessa altezza raggiungerebbero terra nello stesso istante procedendo di moto uniformemente accelerato. Galileo deve però spiegare in che maniera agisce l'attrito del mezzo (in natura non eliminabile - almeno ai suoi tempi) il quale altera tale modello: infatti in natura due gravi di differente peso non toccheranno terra nello stesso istante, ma il più

⁴ In *Giornata prima*. "Noi siamo su 'l volere investigare quello che accadrebbe a i mobili differentissimi di peso in un mezzo dove la resistenza sua fusse nulla, sì che tutta la differenza di velocità che tra essi mobili si ritrovasse, riferir si dovesse alla sola disegualianza di peso; e perchè solo uno spazio del tutto voto d'aria e di ogni altro corpo, ancor che tenue e cedente, sarebbe atto a sensatamente mostrarci quello che ricerchiamo, già che manchiamo di cotale spazio, andremo osservando ciò che si accaggia ne i mezzi più sottili e meno resistenti, in comparazione di quello che si vede accadere negli altri manco sottili e più resistenti: ché se noi troveremo, in fatto, i mobili differenti di gravità meno e meno differir di velocità secondo che i mezzi più e più cedenti si troveranno e che finalmente, ancor che estremamente diseguali di peso, nel mezzo più d'ogni altro tenue, se ben non voto, piccolissima si scorga e quasi inosservabile la diversità della velocità, parmi che ben potremo con molto probabile coniettura credere che nel vacuo sarebbero le velocità loro tutte uguali". Ciò è detto dopo che in precedenza l'ipotesi aveva già trovato una conferma sperimentale. Infatti più sopra, nella stessa giornata, si legge: "Dopo essermi certificato, non esser vero che il medesimo mobile in mezzi di diversa resistenza osservi nella velocità la proporzione delle cedenze di essi mezzi; né meno che nel medesimo mezzo mobili di diversa gravità ritengano nelle velocità loro la proporzione di esse gravità (intendendo anco delle gravità diverse in specie); cominciai a comporre insieme amendue questi accidenti, avvertendo quello che accadesse de i mobili differenti di gravità posti in mezzi di diverse resistenze: e m'accorsi, le disegualità delle velocità trovarsi tuttavia maggiori ne i mezzi più resistenti che ne i più cedenti, e ciò con diversità tali, che di due mobili che scendendo per aria pochissimo differiranno in velocità di moto, nell'acqua l'uno si muoverà dieci volte più veloce dell'altro; anzi che tale che nell'aria velocemente scende, nell'acqua non solo non scenderà, ma resterà del tutto privo di moto, e, quel che è più, si muoverà all'in su: perchè si potrà tal volta trovare qualche sorte di legno, o qualche nodo o radica di quello, che nell'acqua potrà stare, in quiete, che nell'aria velocemente scenderà".

pesante toccherà terra un po' prima, per quanto, come visto, non tanto prima quanto vorrebbero gli Aristotelici.

La spiegazione di Galileo, piuttosto articolata e non compiutamente espressa nel corpo del testo (quindi da noi ricostruita associando vari passaggi testuali), è la seguente: posto come le velocità di caduta di due gravi lasciati cadere dalla stessa altezza sarebbero, nel vuoto, le stesse, indipendentemente dal loro peso, entrambi si trovano in natura a dover vincere la resistenza del mezzo e tale resistenza viene superata grazie al peso del grave stesso in caduta. Così un grave di peso x si trova nella caduta a doversi far largo nel mezzo spostandone un volume pari al suo stesso volume: questo volume del mezzo spostato sui lati ha un peso ed è il rapporto fra tale peso e il peso del grave in caduta a determinare il rallentamento della velocità di caduta, che, in condizioni di vuoto, sarebbe la stessa per ogni grave⁵. Esemplificando: dati due gravi qualsiasi a e b ed un mezzo qualsiasi c , se il peso di c è la metà (50%) di quello di a e $3/4$ (75%) quello di b , ciò vorrà dire che la velocità di a e b (supposta uguale nel vuoto per essi così come per ogni altro grave fatto cadere dalla stessa altezza), sarà rallentata nel caso di a del 50% e nel caso di b del 75%, il che vale a dire che, su 100 unità di spazio che a e b avrebbero percorso nello stesso tempo, a ne percorre 50 e b solo 25, cioè la velocità di a risulta doppia di quella di b ed in ogni caso inferiore a quella che entrambi avrebbero avuto nel vuoto. Ora, siccome la velocità di caduta non è costante ma aumenta costantemente all'aumentare del tempo dall'inizio del moto, cioè per ogni frazione uguale qualsiasi di tempo, il moto acquisisce, a partire dalla quiete, una pari accelerazione, ciò vorrà dire che ognuna di tale accelerazioni successive di a e b dovrà conservare la medesima proporzione, cioè, se in un tempo qualsiasi t dall'inizio del moto, b acquista una velocità x , a dovrà acquistare una velocità $2x$. Un'ulteriore considerazione mostra come, seguendo nel tempo le distanze percorse da a e da b , a acquisti un vantaggio progressivamente maggiore su b , cioè si divarichi, a vantaggio di a , la differenza fra lo spazio dai due gravi percorso. Vediamo la cosa nel dettaglio. Nel nostro esempio, quale che sia la velocità di b in un certo momento t a partire dall'inizio del moto (tempo 0), in quel momento la velocità di a dovrà essere doppia: così se nel tempo t b ha percorso una distanza di 5, in quello stesso tempo a avrà percorso una distanza doppia, cioè di 10. Siccome il moto di caduta è uniformemente accelerato, in un tempo $2t$, b avrà acquistato una velocità doppia a quella che aveva in t , e, così, se in t aveva percorso una distanza di 5, in $2t$ ne avrà percorso una di $20 = 10 \cdot 2$, a per parte sua, ne avrà invece percorso una di $40 = 20 \cdot 2$; in $3t$ b avrà percorso una distanza di $45 = 15 \cdot 3$ e a una di $90 = 30 \cdot 3$; in $4t$ b di $80 = 20 \cdot 4$ e a di $160 = 40 \cdot 4$. Se osserviamo le differenze fra i tempi di caduta di b e di a per ogni frazione di tempo successiva t , $2t$, $3t$ e $4t$, notiamo come in t a sopravanza b di 5 ($= 10 - 5$), in $2t$ di 10 ($= 40 - 20$), in $3t$ di 45 ($= 90 - 45$), in $4t$ di 80 ($= 160 - 80$). Il modello esplicativo proposto da Galileo rende conto di una "sensata esperienza" cui tutti possiamo accedere: se, infatti, si lasciano cadere nello stesso mezzo due gravi di differente peso da varie altezze, si può notare come, più l'altezza di caduta è maggiore, più, nella caduta, il più grave sopravanza il più leggero, talché, due gravi che fatti cadere da poca altezza dal suolo si anticipano

⁵ In *Giornata prima*: "Posto dunque questo principio, che nel mezzo dove, o per esser vacuo o per altro, non fusse resistenza veruna che ostasse alla velocità del moto, sì che di tutti i mobili le velocità fosser pari; potremo assai congruamente assegnar le proporzioni delle velocità di mobili simili e dissimili nell'istesso ed in diversi mezzi pieni, e però resistenti: e ciò conseguiremo col por mente quanto la gravità del mezzo detrae alla gravità del mobile, la qual gravità è lo strumento col quale il mobile si fa strada, respingendo le parti nel mezzo alle bande, operazione che non accade nel mezzo vacuo, e che però differenza nessuna si ha da attendere dalla diversa gravità; e perchè è manifesto, il mezzo detrarre alla gravità del corpo da lui contenuto quant'è il peso di altrettanta della sua materia, scemando con tal proporzione la velocità de i mobili, che nel mezzo non resistente sarebbero (come si è supposto) eguali, aremo l'intento".

di una distanza spaziale minima ed a volte appena percettibile, fatti cadere da maggiori distanze possono anticiparsi di parecchie unità di spazio⁶.

Occorre poi completare (e complicare) il modello con un'avvertenza che Galileo non tarda a far notare: la velocità di caduta, che nel vuoto, come già detto, sarebbe di moto rettilineo uniformemente accelerato per tutti i gravi indipendentemente dal peso, non solo è alterata dall'opposizione che il grave cadendo, a seconda del suo peso, attua rispetto al mezzo (o, detta altrimenti: dall'opposizione del mezzo al grave a seconda del rapporto fra i rispettivi pesi), ma anche dall'aumentare dell'attrito del mezzo all'aumentare della velocità di caduta del grave. Cito:

Dico per tanto che un corpo grave ha da natura intrinseco principio di muoversi verso 'l comun centro dei gravi, cioè del nostro globo terrestre, con movimento continuamente accelerato, ed accelerato sempre egualmente, cioè che in tempi eguali si fanno aggiunte eguali di nuovi momenti e gradi di velocità. E questo si deve intender verificarsi tutta volta che si rimuovessero tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni, tra i quali uno ve ne ha che noi rimuover non possiamo, che è l'impedimento del mezzo pieno, mentre dal mobil cadente deve esser aperto e lateralmente mosso: al qual moto trasversale il mezzo, benchè fluido cedente e quieto, si oppone con resistenza or minore ed ora maggiore, secondo che lentamente o velocemente ei deve aprirsi per dar il trasnito al mobile; il quale, perchè, come ho detto, si va per sua natura continuamente accelerando, vien per conseguenza ad incontrar continuamente resistenza maggiore nel mezzo, e però ritardamento e diminuzione nell'acquisto di nuovi gradi di velocità, sì che finalmente la velocità perviene a tal segno, e la resistenza del mezzo a tal grandezza, che, bilanciandosi fra loro, levano il più accelerarsi, e riducono il mobile in un moto equabile ed uniforme, nel quale egli continua poi di mantenersi sempre (*Giornata prima*).

Il metodo galileiano

Si veda in proposito più sopra: *Il metodo della scienza moderna*.

⁶ In *Giornata prima* si legge: "L'esperienza fatta con due mobili quanto più si possa differenti di peso, col fargli scendere da un'altezza per osservar se la velocità loro sia eguale, patisce qualche difficoltà: imperò che se l'altezza sarà grande, il mezzo, che dall'impeto del cadente deve esser aperto e lateralmente spinto, di molto pregiudizio sarà al piccol momento del mobile leggerissimo che alla violenza del gravissimo, per lo che per lungo spazio il leggero rimarrà indietro; e nell'altezza piccola si potrebbe dubitare se veramente non vi fusse differenza, o pur se ve ne fusse, ma inosservabile".

Note.

(1) La versione completa del principio d'inerzia, prodotta da Newton, è la seguente: “un corpo si mantiene nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, salvo l'azione di agenti contrari”. Galileo s'era limitato a sostenere che un corpo, cui sia impresso un movimento in una certa direzione, si mantiene secondo quel moto, salvo l'azione di agenti contrari.