

PRESENTAZIONE DELL'UNITÀ SULLA FISICA DI GALILEO

Gli studenti del Sarpi sono abituati a studiare gli autori attraverso i testi.

Questa unità vuole presentare soprattutto lo studio della cinematica che si svolge in classe terza, con un criterio simile, cioè andando all'origine delle leggi che si chiede agli studenti di imparare asetticamente, basandosi sui testi (ovviamente una selezione) di Galileo.

L'obiettivo è quello di offrire degli spunti di lavoro magari aggiuntivi a quelli tradizionali proposti dai libri di testo

Struttura dell'unità

1. Non una biografia completa di Galileo, ma i suoi studi iniziali, la presenza all'università di Pisa, e poi di Padova, dove insegna la teoria tolemaica. ([biografia](#))
2. Galileo oltre che matematico può essere anche considerato un letterato (sono presentati alcuni suoi lavori: "Capitolo contro il portar la toga", completo in appendice, un esempio di distico e l'elaborazione geometrica dell'inferno dantesco) e si sottolinea la qualità letteraria e la sua capacità di polemizzare con i propri oppositori e detrattori (sarebbe bello se gli studenti leggessero almeno qualche passo del "Saggiatore") ([letterato](#))
3. I temi scientifici affrontati nell'ottica presentata sono:
 - la relatività galileiana (esercitazione degli studenti per cogliere il concetto di spostamento e [sistema di riferimento](#)) e il [principio di inerzia](#) (il tutto affiancato da una scelta degli scritti galileiani)
 - [La caduta dei gravi](#) (moto uniformemente accelerato) e il concetto di peso di un corpo
 - Studio della relazione spazio-tempo e velocità-tempo nel moto uniformemente accelerato ([piano inclinato](#))
 - Moto del proiettile (corretta definizione della traiettoria mediante il principio della scomposizione dei moti. In laboratorio esiste uno strumento che potrebbe mostrare l'uguale tempo di caduta di due biglie, una in caduta verticale e l'altra dopo un breve tratto lungo un piccolo scivolo. Le due biglie si dovrebbero scontrare lungo il percorso. L'esperienza è però di difficile realizzazione.
 - [Moto del pendolo](#) e sue proprietà. Proposta di un'esperienza da far svolgere agli studenti con l'obiettivo principale di acquisire le competenze iniziali per la stesura di una relazione di fisica e per familiarizzare con l'analisi degli errori sperimentali. (Il risultato non è un numero, ma un intervallo di valori con diverse probabilità)
 - [Misura dell'accelerazione di gravità](#): si può eseguire sia utilizzando il moto del pendolo (offre i risultati più attendibili) o mediante l'uso del piano inclinato
 - [Galileo copernicano](#). Leggi di Keplero (mai utilizzate da Galileo). Questo è un tema decisivo, perché Galileo intende attraverso la sua adesione al sistema copernicano non solo appoggiare una nuova descrizione del moto dei pianeti mediante la fisica necessaria a sostenerla (pur con errori, come quello delle maree), ma introdurre un nuovo metodo scientifico. Galileo ritiene di essere l'uomo giusto per portare a termine questo progetto. Si troveranno a tale riguardo una serie di proposte di lavoro; in particolare
 1. scambio lettere con Keplero; il problema dell'orbita di Marte con una piccola animazione con [Geogebra](#) in grado di mostrare il moto retrogrado del pianeta nello schema deferente-epiciclo.
 2. [Sidereus Nuncius](#) (Galileo diventa uno scienziato di fama europea); [presentazione in .ppt](#) dell'utilizzo del cannocchiale e delle scoperte fatte + filmato del museo galileiano di Firenze
 3. sulle Leggi di Keplero si propone una breve esercitazione con un foglio elettronico per mostrare la differenza tra una legge fisica (quella appunto di Keplero) e una legge empirica (quella di [Titius-Bode](#), tra l'altro molto usata dagli astronomi)
4. Il tema dell'[esistenza del vuoto](#) e della corpuscolarità della materia
5. Il [metodo scientifico](#) introdotto da Galileo con l'ausilio di stralci delle sue opere
6. Applicazione del metodo scientifico a un tentativo di [misura della velocità della luce](#) (filmato dell'Università di Roma, prof. Chiarotti)

Nel materiale è presente anche un tentativo da me fatto di presentare la figura di Galileo e del suo progetto, con relativa sconfitta, in forma "[teatrale](#)". Non ha nessuna ambizione, ma è stato utilizzato con studenti di un istituto tecnico che erano studenti di nome ma non di fatto.

Non richiede alcuna memorizzazione di parti, perché è pensato con un Galileo che scrive ai suoi interlocutori i quali a loro volta rispondono con altre lettere (ovviamente in sintesi). I testi sono pertanto in larga parte tratti dall'epistolario galileiano.

N.B.: tutti i file esterni sono presenti nella cartella dell'unità didattica.

LA FISICA DI GALILEO GALILEI

Studio della Fisica per temi attraverso le opere e la vita di Galileo Galilei

“Parlare oscuramente lo sa fare ognuno, ma chiaro pochissimi”

“Infelice questo nostro clima, nel quale regna una fissa risoluzione di voler estermiare tutte le novità, in particolare nelle scienze, quasi che già si sia saputo ogni scibile.”

Galileo, Lettera a Diodati, 18 dicembre 1635

1° Cenni biografici

Galileo Galilei nasce a Pisa il 15 febbraio 1564, figlio di Vincenzo, di professione musicista, e di Giulia Ammannati, donna d'intelletto fino ma malevola e litigiosa.

Di carattere focoso, per la forte passione interiore, ma accompagnata da poca fermezza e prudenza nel gestirla. Nonostante la costituzione robusta e forte, soffrì dai quarant'anni in poi di acutissimi dolori e da gravi e pericolose malattie.

“Ancorché avido di gloria, non fui mai ambizioso de gli onori del volgo, ma solo di quella fama che dal volgo differenziarmi poteva. Nessun vizio fu per me più detestabile della menzogna, forse perché in grazia delle matematiche scienze troppo bene conoscevo la bellezza della verità”.

Dovette sempre soccorrere alle necessità della madre, presto rimasta vedova, delle sorelle, del fratello Michelangelo, dei nipoti. Per sopperire alle sempre pressanti richieste economiche della famiglia diede private lezioni a gran numero di studenti e nella piccola officina di casa a Padova costruiva e vendeva strumenti geometrici ed astronomici. A questi si aggiungono gli oroscopi per chi non sapeva trovar altrove consolazione o speranza. Questa sua attività gli procurò una denuncia d'eresia, a cui concorse la convivenza con Marina Gamba, da cui ebbe tre figli, due femmine e un maschio, e la non assidua pratica religiosa.

Le due figlie, Virginia e Livia, nate fuori dal matrimonio, potevano solo essere destinate al convento.

“Livia manifestò, nell'acidità del carattere, l'insofferenza per la monacale condizione, che Virginia, suor Maria Celeste, visse invece con rassegnata dolcezza, altruismo e un affetto devoto verso di me che sempre mi fu di gran conforto”.

Dal padre apprese la pratica della musica, sviluppando una buona abilità nel suonare il liuto. Mostrò anche abilità nel disegno e passione per le belle lettere, l'invenzione de' concetti e la spiegatura loro. Apprezzò in particolare l'Orlando Furioso, ritenuto il massimo tra tutti i poeti latini e toscani. Non lo stesso rapporto ebbe con La Gerusalemme liberata considerato pedante il Tasso. Secondo Galileo, il Tasso diceva parole, dove l'Ariosto cose.

2° Studi e attività

Primi studi a Firenze presso il convento di Santa Maria di Vallombrosa. Nel 1581, il padre lo iscrisse alla facoltà di Medicina dell'Università di Pisa. Galileo mostrò però interesse agli studi dei fenomeni naturali. Ostilio Ricci, docente a Pisa, lo introdusse al mondo della matematica e alle opere di Archimede. Galileo non ottenne alcuna laurea; ma, non ancora ventenne, dimostrò l'isocronismo del pendolo e poco dopo inventò la bilancetta idrostatica per la misura della gravità delle sostanze.

La matematica occupava una posizione di scarso rilievo tra le scienze aristoteliche. Tale posizione si rifletteva anche nelle Università, dove gli insegnanti di matematica erano poco considerati e sottopagati rispetto ad altre facoltà come Medicina o a quelle Umanistiche in genere.

Tornato a Firenze, nel 1589 ottenne una cattedra di matematica all'Università di Pisa, poco importante e mal remunerata, dove si scontrò con l'ambiente ipocrita e borioso dell'università!

Le autorità insistevano che i professori indossassero le proprie toghe quando si trovavano in città, con una multa in caso contrario. Galileo odiava a tal punto tale imposizione che scrisse un lungo e irriverente poema contro di essa: *Capitolo contro il portar la toga*".

Tale esercizio letterario non migliorò la sua posizione all'università.

Dall'incipit del libro:

*Mi fan patir costoro il grande stento,
Che vanno il sommo bene investigando,
E per ancor non v'hanno dato drento.
E mi vo col cervello immaginando,
Che questa cosa solamente avviene
Perchè non è dove lo van cercando.
Questi dottor non l'han mai intesa bene,
Mai son entrati per la buona via,
Che gli possa condurre al sommo bene.
Perchè, secondo l'opinion mia,
A chi vuol una cosa ritrovare,
Bisogna adoperar la fantasia,
E giocar d'invenzione, e 'ndovinare;
E se tu non puoi ire a dirittura,
Mill'altre vie ti posson aiutare.*

(se qualche studente fosse curioso, ecco l'intero testo) *Capitolo contro il portar la toga*(#toga)

Nel 1592 ottenne la cattedra di fisica presso l'università di Padova, dove rimase fino al 1610. Ebbe modo di conoscere e apprezzare l'ambiente veneziano e di conoscere alcuni illustri personaggi tra i quali Paolo Sarpi

Nel 1610, dopo la pubblicazione del *Sidereus Nuncius* e la dedica dei satelliti di Giove al granduca di Toscana, tornò a Firenze come matematico di corte senza obblighi di insegnamento.

Valenza letteraria degli scritti di Galileo

La lingua di Galileo, se confrontata con quella ormai sedimentata e codificata di oggi, appare sorprendente per la multiforme ricchezza di termini tra loro equivalenti – verbali, avverbiali, lessicali.

"*Il discorrere è come il correre*", scrive Galileo stesso, e l'affermazione costituisce il suo programma stilistico, come rileva Italo Calvino nelle *Lezioni americane*: "stile come metodo di pensiero e come gusto letterario: la rapidità, l'agilità del ragionamento, l'economia degli argomenti, ma anche la fantasia degli esempi sono per Galileo qualità decisive del pensar bene".

Il valore letterario degli scritti di Galileo ben si riassume nel giudizio di Natalino Sapegno: "La sua opera, per ricchezza di contenuto umano e potenza di stile, si proponeva come un esempio e si inseriva nella storia futura della nostra prosa, come un fatto letterario e culturale di prima grandezza, il più importante anzi, forse, dopo il Machiavelli e prima del Manzoni".

Ma perché riproporre oggi Galileo? Perché la sua lezione, al di là dei contenuti scientifici – e sarà sorprendente scoprire quante credenze pre-galileiane alberghino ancora in noi – non ha perso nulla della sua validità attraverso i secoli.

La lettura delle pagine galileiane non potrà non stimolare il gusto dell'osservare, il desiderio di capire, e il piacere di dare risposte sulla base dell'esperienza e delle deduzioni logiche.

Quanto agli errori di Galileo, essi possono rivelarsi altrettanto preziosi delle sue conquiste più geniali. Da un lato ci permettono di cogliere il suo percorso mentale, dall'altro ci istruiscono sulla complessità e sulla difficoltà del processo conoscitivo.

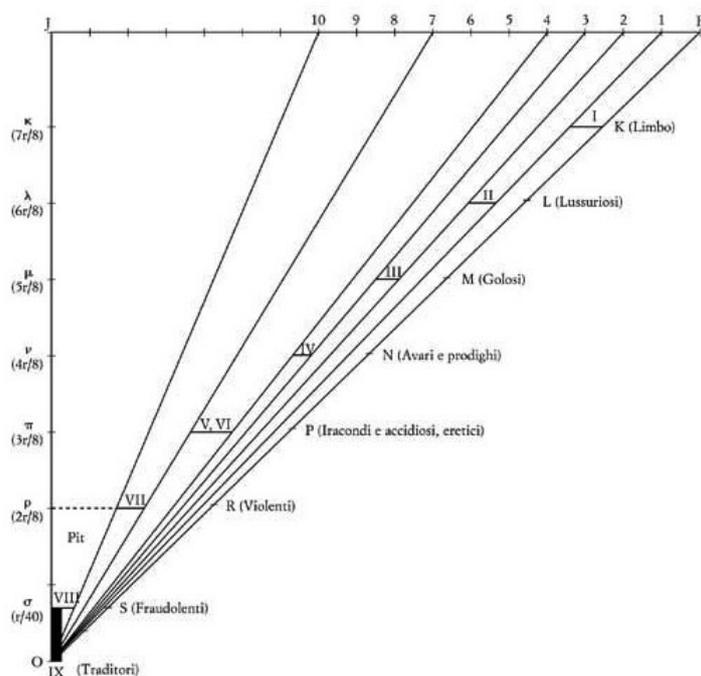
Le opere da lui composte comprendono

- due manciate di poesie

Ecco un esempio in cui un distico di creazione galileiana segue un'apertura in stile petrarchesca mentre il resto procede secondo motivi consueti:

*Or che tuffato il sol nell'onde Ispane
 Ha i fiammeggianti suoi biondi capelli,
 Per Via Mozza raccolte in be' drappelli,
 Sbuca gran moltitudin di puttane.
 Chiuse già sono tutte l'Arti di lane,
 E' setaiuol calon gli sportelli.
 A stuol da' campanili fuggon gli uccelli,
 Storditi dal romor delle campane.
 E al Ponte tutta la cittadinanza
 S'aduna, ove mezz'ora si sollazza,
 Chè questa è di Firenze antica usanza.
 E l'ora si avvicina della mazza;
 Però ti lascio: a Dio, dolce speranza,
 Chè mi conviene andare insino in Piazza.*

- numerose postille alle Rime del Petrarca e all'Orlando Furioso (amato)
- Considerazioni sulla Gerusalemme liberata del Tasso (deprecata)
- due lezioni sull'Inferno di Dante; Senza entrare nel dettaglio dello studio della struttura dell'inferno, basti osservare il suo schema frutto di una serie di calcoli matematici (geometrici).



La matematica dell'inferno. I segmenti orizzontali I, II... indicano l'ampiezza dei livelli; le divisioni lungo JB, intervalli di 100 miglia; σO è il Pozzo dei giganti (non in scala).

LA MECCANICA

Lavoro per lo studente

Obiettivo: Introduzione del concetto di spostamento e sistema di riferimento

Materiale: metro.

Problema: stabilire la posizione dei banchi e costruire la mappa della classe

L'individuazione della posizione di un oggetto in una stanza richiede la scelta del luogo da cui osservare l'intera disposizione.

Il problema che ci poniamo è di valutare se esista una posizione privilegiata oppure se la scelta sia casuale.

Ogni studente

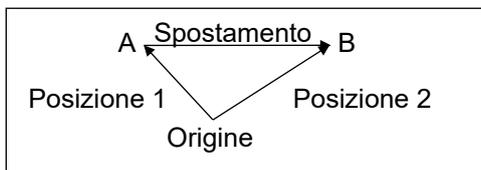
- Osserva la disposizione dei banchi nell'aula e la riproduce schematicamente su un foglio di carta.
- Trasforma ogni banco in un punto (l'intersezione delle diagonali del rettangolo)
- Fissa su questo schema due posizioni: la cattedra e il proprio banco.
- Trasforma lo schema in un piano cartesiano fissando gli assi di riferimento in modo che la cattedra ne sia l'origine.
- Disegna nel piano cartesiano appena tracciato due altri assi perpendicolari aventi ora come origine il banco.
- Determina le posizioni di 4 banchi misurando non la distanza in linea retta, ma lo spostamento in orizzontale e in verticale ($dx-sx$; avanti-dietro), prendendo come punto di partenza prima la cattedra e poi il proprio banco.

Quesiti

- Quale movimento è necessario per far coincidere le due serie di punti?
- Quali sono le coordinate dello studente Stud rispetto alla cattedra o viceversa?
- Quali conclusioni si possono dedurre?

Cerchiamo ora "qualcosa" che rimanga costante (un invariante)

- Calcola le distanze di alcuni punti dall'origine nei due diversi sistemi attraverso la classica formula della distanza, cioè applicando il teorema di Pitagora.
- La distanza tra due punti è la lunghezza del segmento che li congiunge o, se vogliamo tenere conto anche della direzione e del verso per andare da un punto all'altro, del vettore che ha come coda un punto e come punta l'altro punto.
- Calcola ora le distanze tra due punti qualsiasi corrispondenti nei due sistemi. Cosa si osserva?



Dal punto di vista della fisica questa distanza è identificata dal vettore spostamento, che risulta essere quindi dal sistema di riferimento

Riassumendo : La posizione è una grandezza che dal sistema di riferimento, mentre la distanza tra due punti è

(sistema di riferimento) *So che vi è noto che la nostra vista si fa per linea retta, e che se questa medesima si prolunga oltre all'oggetto ed in essa si costituiscono altri oggetti visibili, questi tutti ci appaiono congiunti tra di loro; ma le cose che son poste fuori della detta linea, ci si mostrano separate da essa, e postegli o a destra o a sinistra, secondo che le sono o in questo o in quel modo collocate. E così se,*

riguardando alcuno, v. g., la stella di Venere, s'immaginerà una linea retta tirata dal suo occhio per il centro della stella, e prolungata sino al cielo stellato, gli apparirà Venere congiunta con alcuna stella, se alcuna s'abbatterà ad essere in quella tal linea; e se questa tal linea per avventura andasse a ferire il primo grado d'Ariete, si dirà Venere apparir congiunta, o sottoposta, al primo grado d'Ariete. [...]

Principio di inerzia

Secondo il principio di inerzia, un corpo, una volta posto in movimento, mantiene la propria velocità se è nulla la risultante delle forze cui si trova sottoposto, siano esse agenti o resistenti (tra queste, tipicamente, quella d'attrito). Viene meno allora la necessità di invocare – come faceva Aristotele – una forza di spinta atta a garantire la conservazione del moto. Se una forza interviene, essa ha l'effetto o di frenare il corpo, allorché si contrappone al suo moto, oppure di accelerarlo, se è concorde con esso; mai di conservargli la *velocità* iniziale.

Concetto rivoluzionario, giacché prima di Galileo si riteneva che la velocità di un corpo fosse in qualche modo da collegare a una forza applicata.

In questa impeccabile dissertazione, inviata a Francesco Ingoli come risposta a un suo testo, Galileo enuncia implicitamente i due principi fondamentali di inerzia e di relatività, quelli che in certo modo rappresentano il punto focale della rivoluzione galileiana. L'oggetto del contendere è se la Terra sia immobile – punto di vista aristotelico – oppure orbiti attorno al Sole, nel contempo ruotando su se stessa. Gli argomenti addotti da Ingoli a favore dell'immobilità della Terra e presi in considerazione da Galileo sono essenzialmente tre: primo, una pietra lasciata cadere da una torre scende a perpendicolo, correndo parallelamente alla torre lungo l'intero percorso (vero); secondo, lo stesso avviene per una pietra lasciata cadere dalla cima dell'albero di una nave ferma, ma non già se la nave avanza (falso); terzo, i tiri di un cannone sono di egual gittata se sparati verso Est oppure verso Ovest (vero). Veri o falsi che siano – mostra Galileo – i tre argomenti sono inconcludenti.

Galileo evidenzia le pecche che affliggono l'osservazione dei fenomeni da parte di certi aristotelici, spesso data per buona senza una reale e diretta sperimentazione, nonché i loro ragionamenti, che sovente si possono ritorcere contro loro stessi. L'argomento del sasso che cade alla base della torre, e non a una qualche distanza a Ovest di essa, non prova assolutamente nulla: Galileo dimostra che in entrambi i casi – Terra immobile o Terra in rotazione con velocità costante – la caduta deve avvenire con identiche modalità. Questa conclusione equivale a enunciare al contempo i due principi, di inerzia e di relatività.

Principio di relatività

Il principio di relatività afferma che un fenomeno fisico viene descritto da un'identica legge se visto da un osservatore fermo oppure in moto, purché tale moto sia rettilineo e uniforme, cioè avvenga con velocità costante (in termini scientifici si dice che l'osservatore si trova in un *sistema di riferimento inerziale*). Più in generale: le leggi fisiche sono le stesse per due osservatori in moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro.

Soltanto gli osservatori non inerziali – ossia in stato di accelerazione – danno un resoconto diverso del fenomeno. Osservatori posti sulla superficie della Terra, a rigor di logica, non sono inerziali, perché la rotazione terrestre li fa muovere lungo un arco (o, se vogliamo, conferisce loro un'accelerazione radiale). Tuttavia, data la grandezza del raggio terrestre, il loro moto differisce poco da un moto rettilineo uniforme e l'errore che si fa trattandoli come osservatori inerziali è molto piccolo. È per questo motivo che Galileo non confuta, anzi accoglie l'analogia fatta da Ingoli tra caduta di un corpo da una torre sulla terraferma e dall'albero di una nave in movimento.

LETTERA A FRANCESCO INGOLI IN RISPOSTA ALLA DISPUTATIO DE SITU ET QUIETE TERRAE
Voi, con Aristotile ed altri, dite: Se la Terra girasse in sé stessa in 24 ore, le pietre e gli altri corpi gravi cadenti da alto a basso, dalla cima, v. g., d'un'alta torre, non verrebbero a percuotere in Terra al piede della torre; avvenga che nel tempo che la pietra si trattiene per aria, scendendo verso il centro della Terra, essa Terra, procedendo con somma velocità verso levante e portando seco il piede della torre, verrebbe per necessità a lasciarsi a dietro la pietra per tanto spazio, per quanto la vertigine della Terra nel medesimo tempo fusse scorsa avanti, che sarebbero molte centinaia di braccia. Il qual discorso

confermano poi con un esempio preso da un'altra esperienza, dicendo ciò manifestamente vedersi in una nave, nella quale se, mentre ella sta ferma in porto, si lascia dalla sommità dell'albero cader liberamente una pietra, quella, scendendo a perpendicolo, va a percuotere al piede dell'albero, ed in quel punto precisamente che risponde a piombo sotto il luogo di dove si lasciò cadere il sasso; il quale effetto non avviene (soggiungono essi) quando la nave si muove con veloce corso; imperò che nel tempo che la pietra consuma nel venir da alto a basso e che ella, posta in libertà, perpendicolarmente scende, scorrendo il navilio avanti, si lascia per molte braccia il sasso per poppa lontano dal piede dell'albero; conforme al quale effetto dovrebbe seguire del sasso cadente dalla cima della torre, quando la Terra circolasse con tanta velocità. Questo è il discorso: nel quale pur troppo apertamente scorgo ambedue gli errori de' quali io parlo. Imperò che, che la pietra cadente dalla cima della torre si muova per linea retta e perpendicolare alla superficie terrestre, né Aristotile né voi da altro lo raccogliete, né potete raccorre, se non dal vedere come nel suo scendere ella vien, per così dire, lambendo la superficie della torre, eretta a perpendicolo sopra la Terra; sì che si scorge, la linea descritta dalla pietra esser retta essa ancora e perpendicolare. Ma io qui vi dico che da questa apparenza non si può altramente inferir cotesto se non supposto che la Terra stia immobile mentre la pietra scende, che è poi il quesito che si cerca; perché, se io col Copernico dirò che la Terra va in giro e seco in conseguenza porta la torre e noi ancora che osserviamo l'effetto della pietra, diremo che la pietra si muove d'un moto composto dell'universal diurno circolare verso levante e dell'altro accidentario retto verso il suo tutto, da i quali ne risulta uno inclinato verso oriente; de i quali quello ch'è comune a me, alla pietra ed alla torre, mi resta in questo caso impercettibile e come se non fusse, e solo rimane osservabile l'altro, del quale la torre ed io manchiamo, cioè l'avvicinamento alla Terra. [...]

DIALOGO SOPRA I DUE MASSIMI SISTEMI

La stanza sotto coperta

In esso, Galileo enuncia il principio di relatività e ne suggerisce implicitamente la concatenazione con quello di inerzia (il principio di relatività implica il principio di inerzia). L'incantevole realismo del passo è una spia di come l'occhio indagatore di Galileo si posi sui fenomeni e sugli oggetti più umili del quotidiano con la stessa curiosità e attenzione con cui esplora gli spazi celesti.

Vale la pena di evidenziare il comportamento galileiano per tanti giovani che oggi si avvicinano alla scienza perché attratti dal fascino lontano delle galassie o dei buchi neri, ma restano ciechi e indifferenti di fronte ai mille perché che salgono dall'esperienza quotidiana.

Nella maggiore stanza che sia sotto coperta di alcun gran navilio riserratevi con qualche amico, e quivi fate di aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; pigliatevi anco un gran vaso con acqua, e dentrovi de' pescetti; accomodate ancora qualche vaso alto che vada gocciolando in un altro basso e di angusta gola: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci, gli vedrete andar vagando indifferentemente verso qual si voglia parte delle sponde del vaso; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico vostro alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettar verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando, come si dice, a pie' giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che averete bene tutte queste cose, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e 'n là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutte le nominate cose, né da alcuna di quelle, né meno da cosa che sia in voi stesso, potrete assicurarvi se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete voi maggior salti verso la poppa che verso la prua, ben che, nel tempo che voi state in aria, il tavolato scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando un frutto all'amico, non con più forza bisognerà gettarglielo, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso la poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le gocce cadranno nel vaso inferiore senza restarne pur una verso poppa, ancor che, mentre la goccia è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella loro acqua non più fatica dureranno per notare verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza andranno a prender il cibo

che voi gli metterete su qual si voglia parte dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche dureranno a volare indifferentemente verso tutte le parti, né si ridurranno mai a ritirarsi verso la parte che riguarda la poppa, quasi che le fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo esse saranno state separate, cioè mentre restarono sospese in aria; e se abbruciando alcuna lagrimetta d'incenso farete un poco di fumo, vedrete quello ascender in alto e quivi trattenersi, ed a guisa di nugoletta indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte. E se voi di tutti questi effetti mi domanderete la cagione, vi risponderò per ora: «Perché il moto universale della nave, essendo comunicato all'aria ed a tutte quelle cose che in essa vengono contenute, e non essendo contrario alla naturale inclinazione di quelle, in foro indelebilmente si conserva»; altra volta poi ne sentirete risposte particolari e diffusamente spiegate. Or, quando voi abbiate vedute tutte queste esperienze, e come questi movimenti, ben che accidentarii ed avventizii, ci si mostrano i medesimi appunto così quando la nave si muova quanto se ella stia ferma, non lascerete voi ogni dubbio che l'istesso deva accadere intorno al globo terrestre, tutta volta che l'aria vadia insieme con quello? e tanto più ancora, quanto quel moto universale, che nella nave è accidentario, noi lo ponghiamo, in Terra e nelle cose terrestri, come suo naturale e proprio. Aggiungete di più, che nella nave noi, ben che cento volte abbiamo provato a farla muovere e a farla star ferma, né però mai abbiamo potuto imparare a conoscere dalle cose interne quello ch'ella faccia: come sarà possibile conoscer questo nella Terra, la quale noi abbiamo auta sempre in un medesimo stato?

Una considerazione per i più esperti.

Quanto incide sul ragionamento di Galileo (la pietra in caduta libera da una torre arriva nello stesso punto in cui giungerebbe se la Terra fosse immobile) l'aver assunto che il sistema terrestre sia inerziale? In un sistema ruotante, un corpo in movimento è soggetto alla forza di Coriolis, quella stessa che induce la rotazione del piano di oscillazione del pendolo di Foucault. Tralasciando di svolgere i conti, tale forza farebbe deviare leggermente la traiettoria della pietra dal perfetto perpendicolo, dando luogo a uno spostamento verso Est del punto di impatto pari a (risultato approssimato, valido all'equatore):

$$\Delta x \simeq \frac{gt^3}{3} \simeq 2 \text{ cm}$$

Come cadono i gravi

Un problema che da sempre ha suscitato l'interesse degli uomini è quale sia la vera ragione per cui due corpi diversi in caduta da una stessa altezza impiegano tempi differenti a toccare terra. Tempi che, inoltre, cambiano se varia il mezzo in cui avviene la caduta, come si verifica subito confrontando il comportamento di un grave in aria e in acqua, tanto per fare riferimento ai mezzi più comuni.

La risposta più istintiva è quella fornita dai filosofi aristotelici: il corpo di maggior peso arriva a terra prima perché le velocità di caduta sono proporzionali ai pesi. Circa il ruolo del mezzo ambiente, sempre secondo Aristotele, la velocità di caduta sarebbe inversamente proporzionale alla sua densità. Tale concezione non spiega diverse cose, ad esempio perché, a parità di peso del corpo e a parità di mezzo ambiente, i tempi di caduta possono comunque differire se i due corpi hanno forma diversa, più aerodinamica o meno.

Oggi sappiamo che la forza complessiva agente sul corpo è data dalla differenza tra forza peso e forza d'attrito associata alla resistenza del mezzo.

Per la legge di Newton, il corpo accelera solo se la forza complessiva agente su di esso è diversa da zero, altrimenti la sua velocità si mantiene costante.

È appena necessario ricordare che, mentre il peso resta fisso durante la caduta, la forza d'attrito cresce man mano che aumenta la velocità del corpo. Se il peso è grande, esso rimane preponderante per un lungo tragitto e la caduta differisce poco da quella libera (caduta nel vuoto): è il caso di una biglia di piombo. Se la biglia fosse di sughero, la forza d'attrito pareggierebbe presto il peso, così da impedire ogni ulteriore accelerazione del corpo e fargli assumere una definita velocità terminale (tale comportamento è ben visibile nella discesa di un paracadutista).

Vediamo ora il discorso nella veste originale.

SALV. [...] io grandemente dubito che Aristotele non sperimentasse mai quanto sia vero che due pietre, una più grave dell'altra dieci volte, lasciate nel medesimo instante 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 avere né anco sceso dieci braccia.....

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.

Quando dunque noi avessimo due mobili, le naturali velocità de i quali fussero ineguali, è manifesto che se noi congiugnissimo 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?

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, congiugnendole 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 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 muova più velocemente del men grave, io vi concludo, il più grave muoversi men velocemente. ...

...Veduto come la differenza di velocità, ne i mobili di gravità diverse, si trova esser sommamente maggiore ne i mezzi più e più resistenti; ma che più? nel mezzo dell'argento vivo l'oro non solamente va in fondo più velocemente del piombo, ma esso solo vi discende, e gli altri metalli e pietre tutti vi si muovono in su e vi galleggiano, dove che tra palle d'oro, di piombo, di rame, di porfido, o di altre materie gravi, quasi del tutto insensibile sarà la disegualità del moto per aria, ché sicuramente una palla d'oro nel fine della scesa di cento braccia non preverrà una di rame di quattro dita; veduto, dico, questo,

cascai in opinione che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie descenderebbero con eguali velocità.

Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo

Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, pubblicato nel 1632, egli riprende il confronto tra la caduta della pietra da una torre sulla terraferma e dall'albero di una nave in movimento. È sulla presunta differenza di comportamento nei due casi – puntualmente smentita da Galileo – che i seguaci di Aristotele fondano la loro asserzione che la Terra non ruota. Qui il discorso è arricchito da una dovizia di nuovi esempi, che si superano l'un l'altro nel corroborare le argomentazioni di Galileo.

Anzitutto, il delizioso trabocchetto in cui Salviati attira Simplicio, facendogli dire, benché con riluttanza, che in assenza di «impedimenti esterni» un corpo che si trovi in movimento vi permane indefinitamente. Da qui a concludere che la pietra deve cadere in ogni caso al piede dell'albero, sia che la nave viaggi, sia che resti ferma, il passo è breve. Con buona pace degli aristotelici, si estingue così l'argomento che la caduta a perpendicolo dalla torre sia una prova dell'immobilità della Terra.

Non meno gustoso è il tema che segue: la confutazione della credenza degli aristotelici che un corpo lanciato nell'aria avanzi non tanto per inerzia, quanto perché trasportato dall'aria stessa; cui sarebbe stato trasmesso un impulso dal braccio del lanciatore. Di nuovo Simplicio finisce nei guai allorché Sagredo gli dimostra che in tal caso una freccia scagliata per traverso, anziché con la punta in avanti, andrebbe più lontano.

Moto dei proietti

Il terzo passo di particolare rilevanza è quello in cui Galileo afferma che due moti tra loro perpendicolari non si influenzano affatto, ciascuno svolgendosi esattamente nel modo in cui si svolgerebbe ove l'altro fosse assente. Ed ecco il celebre brano, questa volta messo in bocca a Sagredo, dove si argomenta che una palla di cannone sparata orizzontalmente a grandissima velocità arriva a terra nello stesso tempo di un'altra lasciata cadere senza spinta dalla bocca della colubrina (trascurando, ovviamente, piccole differenze dovute all'attrito dell'aria). Questo perché, appunto, il moto di discesa della palla lungo la verticale non risente di quello orizzontale. Risultato che, ancora oggi, molti troverebbero sorprendente, tanto lontana dal senso comune è l'idea dell'indipendenza dei due moti.

Inserire lo studio del moto del proiettile che utilizza per la corretta definizione della traiettoria il principio della scomposizione dei moti.

In laboratorio esiste uno strumento che potrebbe mostrare l'uguale tempo di caduta di due biglie, una in caduta verticale e l'altra dopo un breve tratto lungo un piccolo scivolo.

Le due biglie si dovrebbero scontrare lungo il percorso.

L'esperienza è però di difficile realizzazione.

Caduta dall'albero maestro

SALV. [...] Voi dite: «Perche, quando la nave sta ferma, il sasso cade al pie' dell'albero, e quando ell'è in moto cade lontano dal piede, adunque, per il converso, dal cadere il sasso al piede si inferisce la nave star ferma, e dal caderne lontano s'argomenta la nave muoversi; e perché quello che occorre della nave deve parimente accader della Terra, però dal cader della pietra al piè della torre si inferisce di necessità l'immobilità del globo terrestre». Non è questo il vostro discorso?

SIMPL. È per appunto, ridotto in brevità, che lo rende agevolissimo ad apprendersi.

SALV. Or ditemi: se la pietra lasciata dalla cima dell'albero, quando la nave cammina con gran velocità, cadesse precisamente nel medesimo luogo della nave nel quale casca quando la nave sta ferma, qual servizio vi presterebber queste cadute circa l'assicurarvi se 'l vassello sta fermo o pur se cammina?

SIMPL. Assolutamente nissuno: in quel modo che, per esempio, dal batter del polso non si può conoscere se altri dorme o è desto, poiché il polso batte nell'istesso modo ne' dormienti che ne i vegghianti.

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

SALV. Che possa esser che quelli autori la portino senza averla fatta, voi stesso ne sete buon testimonio, 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 'l 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.

Il piano perfettamente levigato

SALV. Io senza esperienza son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perché così è necessario che segua; e più v'aggiungo che voi stesso ancora sapete che non può seguire altrimenti, se ben fingete, o simulate di fingere, di non lo sapere. Ma io son tanto buon cozzon di cervelli, che ve lo farò confessare a viva forza.

[...]

Io non desidero che voi diciate o rispondiate di saper niente altro che quello che voi sicuramente sapete. Però ditemi: quando voi aveste una superficie piana, pulitissima come uno specchio e di materia dura come l'acciaio, e che fusse non parallela all'orizzonte, ma alquanto inclinata, e che sopra di essa voi poneste una palla perfettamente sferica e di materia grave e durissima, come, verbigrazia, di bronzo, lasciata in sua libertà che credete voi che ella facesse? non credete voi (sì come credo io) che ella stesse ferma?

SIMPL. Se quella superficie fusse inclinata?

SALV. Sì, ché così già ho supposto.

SIMPL. Io non credo che ella si fermasse altrimenti, anzi pur son sicuro ch'ella si moverebbe verso il declive spontaneamente.

SALV. Avvertite bene a quel che voi dite, signor Simplicio, perché io son sicuro ch'ella si fermerebbe in qualunque luogo voi la posaste.

SIMPL. Come voi, signor Salviati, vi servite di questa sorte di supposizioni, io comincerò a non mi maravigliar che voi concludiate conclusioni falsissime.

SALV. Avete dunque per sicurissimo ch'ella si moverebbe verso il declive spontaneamente?

SIMPL. Che dubbio?

SALV. E questo lo tenete per fermo, non perché io ve l'abbia insegnato (perché io cercavo di persuadervi il contrario), ma per voi stesso e per il vostro giudizio naturale.

SIMPL. Ora intendo il vostro artificio: voi dicevi così per tentarmi e (come si dice dal vulgo) per iscalzarmi ma non che in quella guisa credeste veramente.

SALV. Così sta. E quanto durerebbe a muoversi quella palla, e con che velocità? E avvertite che io ho nominata una palla perfettissimamente rotonda ed un piano esquisitamente pulito, per rimuovere tutti gli impedimenti esterni ed accidentarii: e così voglio che voi astragghiate dall'impedimento dell'aria, mediante la sua resistenza all'essere aperta, e tutti gli altri ostacoli accidentarii, se altri ve ne potessero essere.

SIMPL. Ho compreso il tutto benissimo: e quanto alla vostra domanda, rispondo che ella continuerebbe a muoversi in infinito, se tanto durasse la inclinazione del piano, e con movimento accelerato continuamente; ché tale è la natura de i mobili gravi, che vires acquirant eundo: e quanto maggior fusse la declività, maggior sarebbe la velocità.

SALV. Ma quand'altri volesse che quella palla si movesse all'insù sopra quella medesima superficie, credete voi che ella vi andasse?

SIMPL. Spontaneamente no, ma ben strascinatavi o con violenza gettatavi.

SALV. E quando da qualche impeto violentemente impressole ella fusse spinta, quale e quanto sarebbe il suo moto?

SIMPL. Il moto andrebbe sempre languendo e ritardandosi, per esser contro a natura, e sarebbe più lungo o più breve secondo il maggiore o minore impulso e secondo la maggiore o minore acclività.

SALV. [...] Ora ditemi quel che accaderebbe del medesimo mobile sopra una superficie che non fusse né acclive né declive.

SIMPL. Qui bisogna ch'io pensi un poco alla risposta. Non vi essendo declività, non vi può essere inclinazione naturale al moto, e non vi essendo acclività, non vi può esser resistenza all'esser mosso, talché verrebbe ad essere indifferente tra la propensione e la resistenza al moto: parmi dunque che e' dovrebbe restarvi naturalmente fermo. [...]

SALV. Così credo, quando altri ve lo posasse fermo; ma se gli fusse dato impeto verso qualche parte, che seguirebbe?

SIMPL. Seguirebbe il muoversi verso quella parte.

SALV. Ma di che sorte di movimento? di continuamente accelerato, come ne' piani declivi, o di successivamente ritardato, come negli acclivi?

SIMPL. Io non ci so scorgere causa di accelerazion né di ritardamento, non vi essendo né declività né acclività.

SALV. Sì. Ma se non vi fusse causa di ritardamento, molto meno vi dovrebbe esser di quiete quanto dunque vorreste voi che il mobile durasse a muoversi?

SIMPL. Tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie né erta né china.

SALV. Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioè perpetuo?

SIMPL. Parmi di sì, quando il mobile fusse di materia da durare.

SALV. Già questo si è supposto, mentre si è detto che si rimuovano tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni, e la fragilità del mobile, in questo fatto, è un degli impedimenti accidentarii. Ditemi ora: quale stimate voi la cagione del muoversi quella palla spontaneamente sul piano inclinato, e non, senza violenza, sopra l'elevato?

SIMPL. Perché l'inclinazion de' corpi gravi è di muoversi verso 'l centro della Terra, e solo per violenza in su verso la circonferenza; e la superficie inclinata è quella che acquista vicinità al centro, e l'acclive discostamento.

SALV. Adunque una superficie che dovesse esser non declive e non acclive, bisognerebbe che in tutte le sue parti fusse egualmente distante dal centro. Ma di tali superficie ve n'è egli alcuna al mondo?

SIMPL. Non ve ne mancano: ecci quella del nostro globo terrestre, se però ella fusse ben pulita, e non, quale ella è, scabrosa e montuosa; ma vi è quella dell'acqua, mentre è placida e tranquilla

Tornando alla caduta della pietra

SALV. Adunque una nave che vadia movendosi per la bonaccia del mare, è un di quei mobili che scorrono per una di quelle superficie che non sono né declivi né acclivi, e però disposta, quando le fusser rimossi tutti gli ostacoli accidentarii ed esterni, a muoversi, con l'impulso concepito una volta, incessabilmente e uniformemente.

SIMPL. Par che deva esser così.

SALV. E quella pietra ch'è su la cima dell'albero non si muov'ella, portata dalla nave, essa ancora per la circonferenza d'un cerchio intorno al centro, e per conseguenza d'un moto indelebile in lei, rimossi gli impedimenti esterni? e questo moto non è egli così veloce come quel della nave?

SIMPL. Sin qui tutto cammina bene. Ma il resto?

SALV. Cavatene in buon 'ora l'ultima conseguenza da per voi, se da per voi avete sapute tutte le premesse.

SIMPL. Voi volete dir per ultima conclusione, che movendosi quella pietra d'un moto indelebilmente impressole, non l'è per lasciare, anzi è per seguire la nave, ed in ultimo per cadere nel medesimo luogo dove cade quando la nave sta ferma; e così dico io ancora che seguirebbe quando non ci fussero impedimenti esterni, che sturbassero il movimento della pietra dopo esser posta in libertà: li quali impedimenti son due; l'uno è l'essere il mobile impotente a romper l'aria col suo impeto solo, essendogli mancato quello della forza de' remi, del quale era partecipe, come parte della nave, mentre era su l'albero; l'altro è 'l moto novello del cadere a basso, che pur bisogna che sia d'impedimento all'altro progressivo.

Si arriva finalmente al momento atteso da Salviati, l'esposizione dell'erronea idea aristotelica che i due moti secondo l'orizzontale e la verticale debbano influenzarsi vicendevolmente. Egli si affretta a farne un boccone.

SALV. Quanto all'impedimento dell'aria, io non ve lo nego; e quando il cadente fusse materia leggiera, come una penna o un fiocco di lana, il ritardamento sarebbe molto grande; ma in una pietra grave, è piccolissimo [...]. Tuttavia, come ho detto, vi concedo questo piccolo effetto, che può dependere da tale impedimento; sì come so che voi concederete a me che quando l'aria si movesse con l'istessa velocità della nave e del sasso, impedimento sarebbe assolutamente nullo. Quanto all'altro, del sopra vegnente moto in giù, prima è manifesto che questi due, dico il circolare intorno al centro e 'l retto verso 'l centro, non son contrarii né destruttivi l'un dell'altro né incompatibile, perché, quanto al mobile, ei non ha repugnanza alcuna a cotal moto: ché già voi stesso avete concesso, la repugnanza esser contro al moto che allontana dal centro, e l'inclinazione, verso il moto che avvicina al centro; onde necessariamente segue che al moto che non appressa né discosta dal centro, non ha il mobile né repugnanza né propensione né, in conseguenza, cagione di diminuirsi in lui la facultà impressagli: e perché la causa motrice non è una sola, che si abbia, per la nuova operazione, a inlanguidire, ma son due tra loro distinte, delle quali la gravità attende solo a tirare il mobile al centro, e la virtù impressa condurlo intorno al centro, non resta occasione alcuna d'impedimento.

piano inclinato

Si descrive la celebre esperienza della sfera che scende lungo un piano inclinato, pensata per dimostrare che nel moto uniformemente accelerato gli spazi percorsi sono proporzionali ai quadrati dei tempi impiegati. L'esperienza serve a convalidare l'ipotesi che la velocità vada crescendo in proporzione col tempo, e non con lo spazio percorso, come molti credevano all'epoca di Galileo, ed egli stesso, nella prima fase dei suoi studi.

L'esperimento del piano inclinato

Accertato che nel moto uniformemente accelerato la proporzionalità tra velocità e spazio percorso non sussiste, Galileo si vota alla seconda alternativa, ossia che la velocità cresca con il tempo fluuto dal momento dell'avvio del moto. Si noti bene, egli non dispone del calcolo infinitesimale, che gli permetterebbe di dimostrare subito la validità di tale posizione, e dunque necessita di una verifica sperimentale.

Purtroppo la determinazione della velocità istantanea, dati i grossolani mezzi che ha a disposizione per la misura del tempo, non è per lui fattibile. Galileo si limita allora a una misura dello spazio percorso in funzione del tempo, e da questi dati risale all'informazione cercata basandosi sull'insieme di intuizioni e di ragionamenti sopra riportati.

Per superare le difficoltà sperimentali, la soluzione è quella di far rotolare il grave, in forma di sfera metallica, lungo una guida inclinata; abbastanza poco inclinata da allungare di molto i tempi in gioco e permetterne una agevole misurazione pur con il primitivo sistema del vaso forato – il *cronometro ad acqua* – che Galileo descrive.

Naturalmente è indispensabile dimostrare che le due cadute, perpendicolare e obliqua, sono regolate dalla stessa legge.

L'eguaglianza della velocità, a una data quota lungo qualsivoglia guida inclinata, è dovuta alla conservazione dell'energia: la diminuzione di energia gravitazionale della sfera nello scendere dal livello A al livello B si traduce tutta in energia cinetica (purché l'attrito sia trascurabile), e dunque comporta identiche velocità, sia di traslazione che di rotazione.

È stato tuttavia recentemente dimostrato che l'esperimento della guida inclinata è del tutto fattibile anche con il cronometro ad acqua di Galileo.

Lo scopo dell'esperienza è soprattutto quello di far acquisire agli studenti la capacità di scrivere una relazione scientifica basata sull'analisi dei dati. Dal punto di vista matematico l'esperienza consente di verificare la proporzionalità tra velocità e tempo e/o tra distanza percorsa e quadrato del tempo impiegato.

Esperienza di laboratorio possibile in due modi:

Strumentazione

1) - Se gli studenti misurano: uso della rotaia (2,20 m)

- misura dell'angolo di inclinazione con un goniometro (è consigliata una inclinazione piccola, in modo di avere tempi di misura rilevabili)
- suddividere il piano inclinato in quattro parti uguali e disporre gli studenti con cronometri nelle posizioni individuate dalle suddivisioni (inizio e arrivo compresi)
- dopo il via, ogni studente misura il tempo impiegato dal carrello a giungere alla propria posizione. Tale misura va ripetuta un certo numero di volte dopo alcune misure di prova
- Ricavare il valore dell'accelerazione, ciò che si può conseguire con discreta approssimazione, mediante l'analisi dei dati.

2) – Esperienza dalla cattedra

- strumentazione Pasco (basta un pc con installato Pasco Caption) e il carrello smart cart in grado di trasmettere, via bluetooth, i dati relativi alla sua posizione, velocità e accelerazione al software e di mostrare quindi anche graficamente le relazioni tra le grandezze indicate.

Moto del pendolo

Galileo è il primo scienziato italiano a studiare il fenomeno in modo sistematico e a trattare l'argomento con rigore scientifico.

Nel discorso di Galileo, la nozione dell'isocronismo porta a quella che le velocità di oscillazione di due masse – una di piombo e una di sughero – a parità di lunghezza del filo e di ampiezza di oscillazione sono eguali. Proprietà questa che, non essendo **la discesa del pendolo altro che una caduta lungo un arco circolare**, rientra nelle modalità di caduta dei gravi, identiche, secondo Galileo, per tutti i corpi, purché sia lecito trascurare effetti secondari come la resistenza offerta dal mezzo. Nel pendolo, tuttavia, si manifesta un fatto nuovo, concettualmente imprevedibile, anche per Galileo, e rilevabile solo con l'osservazione sperimentale: il tempo di caduta è indipendente dalla quota da cui il pendolo parte – oscillazioni isocroniche, appunto – cosa che non è vera per caduta verticale o lungo piani inclinati.⁷

Galileo non pretese mai che l'isocronismo fosse esatto. Sappiamo dal Viviani che egli aveva osservato minuscole differenze nel periodo delle grandi e delle piccole oscillazioni. Tuttavia, conscio com'era degli effetti di resistenza dell'aria, tanto più importanti quanto maggiore è la velocità del corpo (e quindi l'ampiezza di oscillazione), fu indotto ad attribuirle piuttosto a tale «impedimento», che non al fatto che la legge fisica che porta all'isocronismo cessa di valere per ampiezze di oscillazione medie e grandi.

Passando ora alla lettura del testo, si noti la concretezza del ragionamento, il costante riferimento a fenomeni che possono essere osservati da tutti, nonché la naturalezza dello stile discorsivo che, pur interrompendosi più volte a registrare gli umori, la partecipazione e le aspettative dei dialoganti, come accade nella conversazione, procede con lucido rigore verso l'obiettivo prefisso.

Il dialogo inizia – a partire come si è detto dall'eguaglianza delle modalità di caduta libera per due gravi di peso differente – con l'argomentazione riguardante l'indipendenza del periodo delle oscillazioni di un pendolo dal valore della massa oscillante appesa al filo (o spago, o corda, nelle varie terminologie usate da Galileo), seguita da quella dell'isocronismo delle oscillazioni.

La massa del pendolo

SALV. 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 maggior 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. E però sono andato pensando di reiterar tante volte la scesa da piccole altezze, ed accumulare insieme tante di quelle minime differenze di tempo, che potessero intercedere tra l'arrivo al termine del grave e l'arrivo del leggero, che così congiunte facessero un tempo non solo osservabile, ma grandemente osservabile. In oltre, per potermi prevaler di moti quanto si possa tardi, ne i quali manco lavora la resistenza del mezzo in alterar l'effetto che dipende dalla semplice gravità, sono andato pensando di fare scendere i mobili sopra un piano declive, non molto elevato sopra l'orizzontale; ché sopra questo, non meno che nel perpendicolo, potrà scorgersi quello che facciano i gravi differenti di peso: e passando più avanti, ho anco voluto liberarmi da qualche impedimento che potesse nascer dal contatto di essi mobili su 'l detto piano declive: e finalmente ho preso due palle, una di piombo ed una di sughero, quella ben più di cento volte più grave di questa, e ciascheduna di loro ho attaccata a due sottili spaghetti eguali, lunghi quattro o cinque braccia, legati ad alto; allontanata poi l'una e l'altra palla dallo stato perpendicolare, gli ho dato l'andare nell'istesso momento, ed esse, scendendo per le circonferenze de' cerchi descritti da gli spaghetti eguali, (or semidiametri, passate oltre al perpendicolo, son poi per le medesime strade ritornate indietro; e reiterando ben cento volte per lor medesime le andate e le tornate, hanno sensatamente mostrato, come la grave va talmente sotto il tempo della leggiera, che né in ben cento vibrazioni, né in mille, anticipa il tempo d'un minimo momento, ma camminano con passo egualissimo. Scorgesi anco l'operazione del mezzo, il quale, arrecando qualche impedimento al moto, assai più diminuisce le vibrazioni del sughero che quelle del piombo, ma non però che le renda più o men frequenti; anzi quando gli archi passati dal

sughero non fusser più che di cinque o sei gradi, e quei del piombo di cinquanta o sessanta, son eglin passati sotto i medesimi tempi. [...]

Isocronismo

SALV. [...] Però notate: slargato il pendolo del piombo, v. g., cinquanta gradi dal perpendicolo e di lì lasciato in libertà, scorre, e passando oltre al perpendicolo quasi altri cinquanta, describe l'arco di quasi cento gradi e ritornando per se stesso indietro, describe un altro poco minore arco, e continuando le sue vibrazioni, dopo gran numero di quelle si riduce finalmente alla quiete. Ciascheduna di tali vibrazioni si fa sotto tempi eguali, tanto quella di novanta gradi, quanto quella di cinquanta, di venti, di dieci e di quattro; sì che, in conseguenza, la velocità del mobile vien sempre languendo, poiché sotto tempi eguali va passando successivamente archi sempre minori e minori. Un simile, anzi l'istesso, effetto fa il sughero pendente da un filo altrettanto lungo, salvo che in minor numero di vibrazioni si conduce alla quiete, come meno atto, mediante la sua leggerezza, a superar l'ostacolo dell'aria: con tutto ciò tutte le vibrazioni, grandi e piccole, si fanno sotto tempi eguali tra di loro, ed eguali ancora a i tempi delle vibrazioni del piombo. Onde è vero che, se mentre il piombo passa un arco di cinquanta gradi, il sughero ne passa uno di dieci, il sughero allora è più tardo del piombo; ma accaderà ancora, all'incontro, che il sughero passi l'arco di cinquanta, quando il piombo passi quel di dieci o di sei: e così, in diversi tempi, or sarà più veloce il piombo ed ora il sughero. Ma se gli stessi mobili passeranno ancora, sotto i medesimi tempi eguali, archi eguali, ben sicuramente si potrà dire allora essere le velocità loro eguali.

Lunghezza del filo

SALV. Vedremo se da questi nostri pendoli si possa cavare qualche sodisfazione a tutte queste difficoltà. [...] Quanto poi alla proporzione de i tempi delle vibrazioni di mobili pendenti da fila di differente lunghezza, sono essi tempi in proporzione suddupla delle lunghezze delle, fila, o vogliam dire le lunghezze esser in duplicata proporzion de i tempi, cioè son come i quadrati de i tempi: sì che volendo, v. g., che 'l tempo d'una vibrazione d'un pendolo sia doppio del tempo d'una vibrazione d'un altro, bisogna che la lunghezza della corda di quello sia quadrupla della lunghezza della corda di questo; ed allora, nel tempo d'una vibrazione di quello, un altro ne farà tre, quando la corda di quello sarà nove volte più lunga dell'altra: dal che ne sèguita che le lunghezze delle corde hanno fra di loro la proporzione che hanno i quadrati de' numeri delle vibrazioni che si fanno nel medesimo tempo.

SAGR. Adunque, se io ho ben inteso, potrò speditamente sapere la lunghezza d'una corda pendente da qualsivoglia grandissima altezza, quando bene il termine sublime dell'attaccatura mi fusse invisibile e solo si vedesse l'altro estremo basso. Imperò che, se io attaccherò qui da basso un assai grave peso a detta corda e farò che si vada vibrando in qua e in là, e che un amico vadia numerando alcune delle sue vibrazioni e che io nell'istesso tempo vadia parimente contando le vibrazioni che farà un altro mobile appeso a un filo di lunghezza precisamente d'un braccio, da i numeri delle vibrazioni di questi pendoli, fatte nell'istesso tempo, troverò la lunghezza della corda [...].

SALV. Né vi ingannerete d'un palmo, e massime se piglierete moltitudini grandi di vibrazioni.

SAGR. V. S. mi dà pur frequentemente occasione d'ammirare la ricchezza ed insieme la somma liberalità della natura, mentre da cose tanto comuni, e direi anco in certo modo vili, ne andate traendo notizie molto curiose e nuove, e bene spesso remote da ogni immaginazione. Io ho ben mille volte posto cura alle vibrazioni, in particolare, delle lampade pendenti in alcune chiese da lunghissime corde, inavvertentemente state mosse da alcuno; ma il più che io cavassi da tale osservazione, fu l'improbabilità dell'opinione di quelli che vogliono che simili moti vengano mantenuti e continuati dal mezzo, cioè dall'aria, perché mi parrebbe bene che l'aria avesse un gran giudizio, ed insieme una poca faccenda, a consumar le ore e le ore di tempo in sospignere con tanta regola in qua e in là un peso pendente: ma che io fussi per apprenderne che quel mobile medesimo, appeso a una corda di cento braccia di lunghezza, slontanato dall'imo punto una volta novanta gradi ed un'altra un grado solo o mezzo, tanto tempo spendesse in passar questo minimo, quanto in passar quel massimo arco, certo non credo che mai l'avrei incontrato, ché ancor ancora mi par che tenga dell'impossibile. Ora sto aspettando di sentire che queste medesime semplicissime minuzie mi assegnino ragioni tali di quei problemi musici, che mi possino, almeno in parte, quietar la mente.

Studio del moto del pendolo all'interno dell'analisi dei moti armonici.

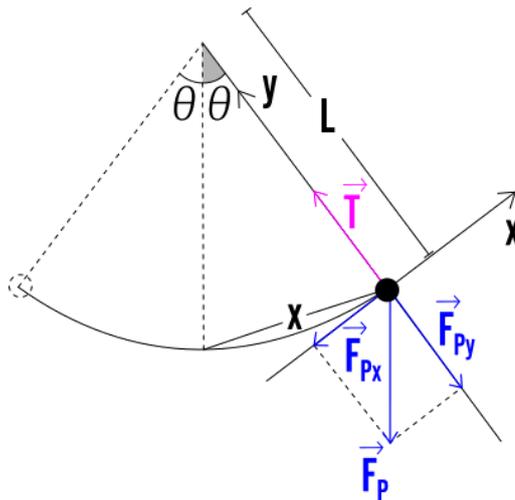
Il pendolo semplice è un'esperienza particolarmente semplice ed efficace per abituare gli studenti a misurare grandezze, a valutarne gli eventuali errori.

Tale esperienza può essere abbinata alla determinazione del valore dell'accelerazione di gravità, g .

In questo caso si può assegnare la relazione tra il periodo del pendolo e la lunghezza del filo per ricavare l'accelerazione di gravità.

Da $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ con l , lunghezza del filo e g , la grandezza da ricavare, si ha

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$



Esecuzione dell'esperienza:

- Montaggio del pendolo semplice (con tecnico)
- Fissazione di traguardi per determinare i punti estremi della oscillazione
- Misura del tempo impiegato a compiersi 10 oscillazioni complete (tale numero serve a ridurre l'errore nella determinazione di un tempo troppo piccolo)
- Analisi dei dati (calcolo media ed eventuale errore percentuale)
- Misura della lunghezza del filo
- Calcolo di g e verifica del risultato

Ovviamente, è possibile anche analizzare il moto del pendolo verificando la relazione di partenza (meglio eseguirla come esperienza dalla cattedra da parte dell'insegnante)

Galileo a Padova

Siamo nel 1597. Galileo insegna Matematica all'Università di Padova all'età di 33 anni. Galileo spiega il sistema tolemaico agli studenti.



Secondo Aristotele, l'intero universo può essere suddiviso tra mondo celeste e sublunare.

Il mondo sublunare è composto dalla mescolanza dei quattro elementi di base: terra, acqua, aria, fuoco ed ha centro la Terra. Ciascuno di questi elementi ha il suo proprio “luogo naturale” e quello dell’elemento terra è situato al centro dell’universo. Esso è circondato dal guscio sferico dell’elemento acqua e questo, a sua volta, dai gusci sferici dell’aria e del fuoco. Quest’ultimo si estende fin sotto la Luna. Se allontanati dal loro luogo naturale, gli elementi tendono a tornarvi, con un “moto naturale”, rettilineo. Esso è diretto dall’alto verso il basso, nel caso degli elementi “pesanti”, cioè la terra e l’acqua; dal basso verso l’alto nel caso degli elementi leggeri, cioè l’aria e il fuoco.

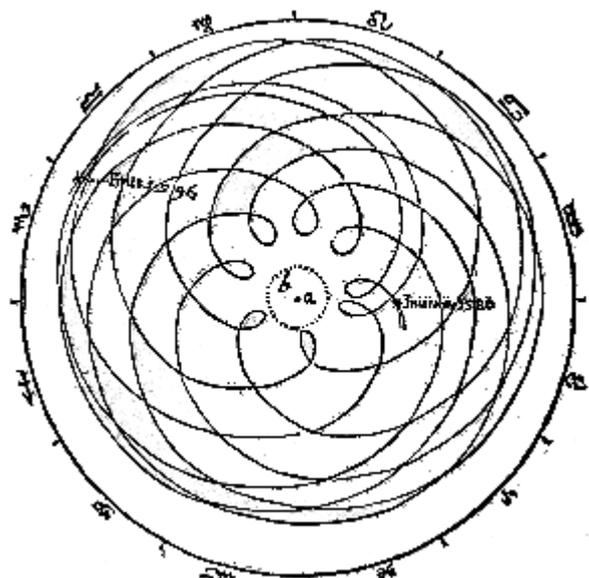
I corpi celesti, come pure le sfere che li trascinano, sono formati solo di etere. Il loro moto naturale è circolare. Essendo fatti solo di etere e non trovando opposizioni sono immutabili.

Alla luce di questa fisica, la struttura dell'universo può essere descritta con la Terra al centro e un complesso sistema di sfere sulle quali ruotano gli altri corpi celesti, compresi i pianeti. Su quella più esterna vi sono le “stelle fisse” e questa, ruotando, trascina nel suo movimento diurno da est a ovest intorno all’asse celeste anche i sottostanti pianeti e il sole.

Ma questi ultimi appaiono dotati di un moto annuo assai irregolare, come si può osservare dal disegno di una loro orbita, ed è pertanto necessario adottare alcune correzioni a questo sistema.

Si introdussero quindi gli epicicli, che vi mostro in una semplice animazione. Più tardi, Tolomeo (circa 130 d.C.) pose la Terra non più al centro delle orbite planetarie, ma in una posizione leggermente eccentrica rispetto a esse.

(si può mostrare una semplice animazione in geogebra, allegata e facendo in modo che la velocità



Orbita di Marte vista dalla Terra (disegno di Keplero)

di rotazione del pianeta sull'epiciclo sia maggiore di quella del punto sul deferente, rapporto almeno 7:1) (**tolomeo.ggb**) (apribile solo con il software geogebra)

Sulla base di queste ipotesi, Tolomeo fu in grado di preparare tavole contenenti la posizione dei pianeti nel corso del tempo. Tali tavole stavano alla base della costruzione dei calendari.

Galileo copernicano

Keplero pubblica nel 1595 il *Mysterium Cosmographicum*, un'opera che si basa sull'accoglimento del sistema copernicano e un anno dopo le *Epistolae astronomicae* di Tycho Brahe.

Estratti dalla lettera a Keplero – agosto 1597

“È soltanto da poche ore che ho ricevuto il tuo libro, di cui ho letto solo la prefazione. Sono veramente felice di avere un compagno così illustre e così amante del vero nella ricerca della verità. È certo una cosa tristissima che gli uomini amanti della verità e che non perseguono un metodo perverso di filosofare siano così rari. Leggerò con cura e animo sereno il tuo libro, perché già da molti anni ho aderito alla teoria di Copernico e perché sono stato in grado di dimostrare le cause di molti fenomeni naturali che certamente nell'ipotesi corrente (il sistema tolemaico) restano inesplicabili. Ho già scritto molte ragioni e confutazioni degli argomenti contrari, ma finora non ho osato pubblicarle, spaventato dalla sorte toccata al nostro maestro Copernico. Troverei certo il coraggio di rendere pubbliche le mie considerazioni se vi fossero molti uomini simili a te; ma dal momento che non se ne trovano, soprassedero al mio negozio”.

Le opere di Keplero, che qui non approfondiamo, rappresentano un notevole passo avanti rispetto alla teoria copernicana, in quanto eliminano tutti i cerchi necessari a descrivere le orbite dei pianeti attorno alla Terra (ricordiamo che i pianeti erano considerati ruotanti attorno a cerchi fisicamente esistenti. Tali cerchi furono eliminati per primo da Brahe), spiegano dal punto di vista cinematico la diversa velocità di rotazione dei pianeti nel loro percorso e introducono una relazione che consente di determinare una relazione tra le loro distanze dal Sole e il periodo di rivoluzione.

La terza legge di Keplero è effettivamente una legge fisica, valida per ogni sistema planetario (sarà applicabile anche ai satelliti di Giove scoperti da Galileo).

Si può confrontare ad esempio la legge di Keplero (come legge fisica) con quella di Titius-Bode (legge puramente empirica) che fu comunque ampiamente utilizzata dagli astronomi.

Esercizio

- In un foglio elettronico costruire due tabelle
 - Trasformare i valori delle distanze dei pianeti ricavabili dalle tavole del libro di testo, ponendo uguale all'unità la distanza della Terra dal Sole;
 - calcolare le stesse distanze applicando la formula empirica di Titius
 - confrontare i due risultati, calcolando gli scarti in percentuale

Legge Titius-Bode: le distanze dei pianeti dal Sole, in U.A., si trovano dalla serie 0 - 3 - 6 - 12 - 24 - 48 - 96 -..., in cui ogni numero, a partire dal terzo, è il doppio del precedente; aggiungendo 4 ad ogni numero e dividendo il risultato per 10 si ottiene

$$0.4 - 0.7 - 1 - 1.6 - 2.8 - 5.2 - 10 - 19.6 - \dots$$

Matematicamente, la serie precedente si esprime con la relazione:

$$d = 0,4 + 0,3 \times 2^n$$

Essa fornisce un buon accordo con le distanze effettive dei pianeti, fino a Urano, mancando però nettamente la posizione di Nettuno.

Malgrado questa sia una relazione empirica, e cioè senza alcuna base fisica, la legge ha avuto il pregio di far sospettare, già nel '700, l'esistenza di un pianeta nella posizione corrispondente a $n = 3$ che doveva essere posto tra Marte e Giove. La scoperta di Cerere, un asteroide, da parte di Padre Piazzi, a Palermo,

nel 1801, confermò la validità della legge, anche se negli anni successivi si verificò che gli asteroidi sono migliaia, la maggior parte dei quali ha orbite comprese tra quella di Marte e di Giove.

La scoperta di numerosi nuovi satelliti di Giove e Saturno ha permesso di comprendere come questa relazione non si applica a questi che si possono a tutti gli effetti intendere come dei Sistemi Solari su scala più piccola. Inoltre Henon nel 1969 e Lecar nel 1973 hanno mostrato che una distribuzione casuale di numeri potrebbe soddisfare una relazione come quella di Titius-Bode con il solo vincolo che siano abbastanza prossimi l'uno all'altro.

Del periodo padovano di Galileo si ha una documentazione scarsa e anche gli studi da lui avviati per sostenere con una fisica l'universo copernicano con una terra dotata di due moti rotatori compariranno a stampa solo più tardi, quando Galileo era già a Firenze.

Galileo a Padova era molto apprezzato e le sue lezioni seguite da numerosi uditori e studenti. La sua fama si estese a livello europeo con la scoperta dei satelliti di Giove, che dedicò ai Medici.

Cannocchiale e Sidereus Nuncius

presentazione allegata (telescopio.pptx) + filmato museo galileiano Firenze (il cannocchiale di Galileo)

Galileo compie un atto rivoluzionario quando punta il cannocchiale al cielo. Da anni ormai, come testimonia una sua lettera a Keplero del 1597, è convinto della bontà della tesi eliocentrica di Copernico, pur essendo costretto a insegnare ancora il sistema tolemaico. Il cannocchiale gli può fornire le prove che gli occorrono.

Il testo e le scoperte in esse contenute furono illustrate e presentate da Galileo in un viaggio a Roma, dove fu accolto dagli studiosi del Collegio Romano che confermarono le sue osservazioni pur non sostenendo le deduzioni a sostegno dell'ipotesi copernicana.

Al ritorno da questo viaggio Galileo si ritiene autorizzato a diffondere fra strati più larghi la validità di tale sistema e far sorgere, attraverso di esso, lo spirito scientifico moderno nel maggior numero possibile di persone. Questo spirito propagandistico sta nello sfondo di due suoi scritti: “*Dialogo sui galleggiamenti*” e soprattutto nelle *Lettere sulle macchie solari*.

Tale opera si approfondirà e diverrà dominante con le famose lettere a Benedetto Castelli, a Monsignor Dini e a Cristina di Lorena, Granduchessa di Toscana.

Galileo assegna al copernicanesimo un significato non solo astronomico, ma come elemento di rottura con il vecchio mondo aristotelico medievale e come inizio di una nuova concezione della realtà.

A differenza di Giordano Bruno, Galileo assegna alla concezione copernicana il valore di punto di convergenza di tutte le nuove ricerche scientifiche, la cui accettazione significa accogliere la metodologia che rende possibili le nuove ricerche scientifiche nella matematica, meccanica e astronomia.

Come sostiene il Geymonat, il peso della teoria copernicana per la filosofia non risiede nel fatto che essa apre la via a nuovi tipi di metafisica, ma nel fatto che rende impossibile la fedeltà al vecchio spirito metafisico.

Anche nel rapporto con la Chiesa, Galileo non si pose mai il problema di un rinnovamento del patrimonio filosofico-teologico della Chiesa, perché per lui, pur essendo un cattolico praticante, il problema religioso non costituiva alcun assillo, ma il suo interesse era rivolto alla potenza organizzativa della Chiesa cattolica e quindi dell'importanza di ottenere alla nuova scienza il suo favore e appoggio.

Galileo considerava la nuova scienza, non come un'attività privata di singoli studiosi, ma come un fatto di interesse pubblico, destinato a permeare di sé l'intera società.

Galileo si ritiene in grado di assumere il compito di ottenere un tale accordo, anche grazie alla fama mondiale acquisita con il *Sidereus nuncius* e alla protezione assicurataagli dalla potente e cattolica famiglia medicea.

Galileo dovrà, come sappiamo, rinunciare a tale compito con la definitiva sconfitta del 1633 con la conseguente condanna e abiura.

Negli anni di arresti domiciliari ad Arcetri, si dedicherà a rielaborare e raggruppare i suoi lavori di meccanica che verranno pubblicati in Olanda nel 1638: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*.

È del tutto chiaro che Galileo non intende addentrarsi in questioni *de Fide* sia per ragioni di prudenza, sia per il suo costituzionale disinteresse verso problemi di ordine metafisico, sia soprattutto per la necessità che avverte – quale scienziato operante nell'Italia cattolica e controriformista del '600 – di passare attraverso la Chiesa per diffondere le proprie idee (il che egli vuole perché pervaso dal sacro fuoco di chi si trova a scoprire verità grandiose e semplici eppure lungamente ignorate). Si limita, nella scia della filologia umanistica, a situare la Scrittura nella storia, per poter giustificare quello che gli preme asserire e cioè che, nelle discussioni scientifiche, essa “*doverebbe esser riserbata nell'ultimo luogo*», e che «*quello de gli effetti naturali che o la sensata esperienza ci pone innanzi a gli occhi o le necessarie dimostrazioni ci concludono, non debba in conto alcuno esser revocato in dubbio per luoghi della Scrittura ch'avesser nelle parole diverso sembante*”.

Ma così facendo egli in sostanza toglie alla Scrittura ogni sacralità, la pone alla stregua di altri testi, che possono essere esaminati e discussi, addentrandosi in un campo estremamente pericoloso.

Eresie e bestemmie nella Bibbia

dalla lettera a Benedetto Castelli [...] *Quanto alla prima domanda generica di Madama Serenissima, parmi che prudentissimamente fusse proposto da quella e concesso e stabilito dalla Paternità vostra, non poter mai la Scrittura Sacra mentire o errare, ma essere i suoi decreti d'assoluta ed inviolabile verità. Solo avrei aggiunto, che, se bene la Scrittura non può errare, potrebbe nondimeno talvolta errare alcuno de' suoi interpreti ed espositori, in varii modi: tra i quali uno sarebbe gravissimo e frequentissimo, quando volessero fermarsi sempre nel puro significato delle parole, perché così vi apparirebbono non solo diverse contradizioni, ma gravi eresie e bestemmie ancora; poi che sarebbe necessario dare a Iddio e piedi e mani e occhi, e non meno affetti corporali e umani, come d'ira, di pentimento, d'odio, e anco talvolta l'obblivione delle cose passate e l'ignoranza delle future. Onde, sì come nella Scrittura si trovano molte proposizioni le quali, quanto al nudo senso delle parole, hanno aspetto diverso dal vero, ma son poste in cotal guisa per accomodarsi all'incapacità del vulgo, così per quei pochi che meritano d'esser separati dalla plebe è necessario che i saggi espositori produchino i veri sensi, e n'additino le ragioni particolari per che siano sotto cotali parole stati profferiti.*

Stante, dunque, che la Scrittura in molti luoghi è non solamente capace, ma necessariamente bisognosa d'esposizioni diverse dall'apparente significato delle parole, mi par che nelle dispute naturali ella dovrebbe esser riserbata nell'ultimo luogo [...]

Io crederei che l'autorità delle Sacre Lettere avesse avuto solamente la mira a persuader agli uomini quegli articoli e proposizioni, che, sendo necessarie per la salute loro e superando ogni umano discorso, non potevano per altra scienza né per altro mezzo farci credibili, che per la bocca dell'istesso Spirito Santo. Ma che quel medesimo 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, non penso che sia necessario il crederlo, e massime in quelle scienze delle quali una minima particella e in conclusioni divise se ne legge nella Scrittura; qual appunto è l'astronomia, di cui ve n'è così piccola parte, che non vi si trovano né pur nominati i pianeti. [...]

Un ulteriore testo, è la famosa lettera a Maria Cristina di Lorena, granduchessa di Toscana. La lettera rappresenta il tentativo teorico più maturo di Galilei in questo sforzo di chiarificazione e ristrutturazione del rapporto tra saperi, tentativo che mirava alla de-responsabilizzazione della Bibbia dal suo utilizzo come fonte d'autorità nella ricerca scientifica.

Galileo, come si vede, ritiene che quella stessa ragione il cui utilizzo è alla base della conoscenza scientifica possa servire ad appianare ogni eventuale contrasto tra le nuove dottrine e i testi sacri. Lo conforta in questo anche l'opinione espressa qualche tempo addietro dal cardinale Conti, consultato da

Galileo stesso, che tra la Bibbia e le sue vedute non esista alcun contrasto insanabile. Ma a noi, alla luce di quello che già stava accadendo in seno alla Chiesa e che sarebbe maturato da lì a poco, la sua fiducia appare quasi una sorta di ingenuità. Tanto più che, a ben guardare, era proprio l'uso allargato dello strumento «ragione» ad allarmare la Chiesa: fosse esso rimasto confinato al mondo ristretto del sapere scientifico non avrebbe rappresentato un pericolo.

Ma Galileo cerca la più ampia diffusione delle sue idee e ha in mente un vasto programma di carattere culturale. Non può quindi sfuggire ai difensori dell'ordine costituito quale minaccia il metodo razionale della discussione e del dubbio, che Galileo ha l'audacia, in pieno clima controriformistico, di applicare ai testi sacri, rappresentati per l'autorità della Chiesa e per i suoi dogmi. E questo al di là della posizione personale di Galileo.

Ma la posta in gioco non è certo il credo personale di uno scienziato per quanto illustre. È la sua libertà intellettuale a costituire una minaccia per l'edificio millenario fondato sul dogma.

Esistenza del vuoto

SIMPL. Gran detto è questo, Sig. Salviati. Io non crederò mai che nell'istesso vacuo, se pur vi si desse il moto, un fiocco di lana si movesse così veloce come un pezzo di piombo.

All'obiezione di Simplicio, Salviati risponde con un discorso il cui senso è il seguente. Non disponendo del vuoto, facciamo esperimenti in mezzi via via meno densi, allo scopo di arrivare a descrivere il comportamento nel vuoto per estrapolazione. Se troveremo che i tempi di caduta di due corpi differenti risultano sempre più ravvicinati quanto meno il mezzo è denso, potremo concludere che nel vuoto essi sarebbero identici.

La ricerca scientifica post-galileiana si varrà di questa procedura estrapolativa per determinare proprietà che non possono venire osservate.

Dico per tanto che un corpo grave ha da natura intrinseco principio di muoversi verso 'l comun centro de i 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. [accelerazione costante] E questo si deve intender verificarsi tutta volta che si rimovessero 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 mobile cadente deve esser aperto e lateralmente mosso: al qual moto trasversale il mezzo, benché fluido cedente e quieto, si oppone con resistenza or minore ed or maggiore e maggiore, secondo che lentamente o velocemente ei deve aprirsi per dar il transito al mobile; il quale, perché, 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. E dunque, nel mezzo, accrescimento di resistenza, non perché si muti la sua essenza, ma perché si altera la velocità con la quale ei deve aprirsi e lateralmente muoversi per cedere il passaggio al cadente, il quale va successivamente accelerandosi.

Imperò che, quanto alla velocità, secondo che questa sarà maggiore, maggiore sarà il contrasto fattogli dall'aria; la quale anco impedirà più i mobili secondo che saranno men gravi: talché, se bene il grave descendente dovrebbe andare accelerandosi in duplicata proporzione della durazion del suo moto, tuttavia, per gravissimo che fusse il mobile, nel venir da grandissime altezze sarà tale l'impedimento dell'aria. che gli torrà il poter crescere più la sua velocità, e lo ridurrà ad un moto uniforme ed equabile; e questa adeguazione tanto più presto ed in minori altezze si otterrà, quanto il mobile sarà men grave.

I passi di seguito presentati sono tratti da *Il Saggiatore*. Le capacità dialettiche e il gusto prettamente toscano della satira che caratterizzano quest'opera, sul cui contenuto si dirà qualcosa in più nel Capitolo 20, divertivano molto papa Urbano VIII, che si faceva leggere pagine del libro durante i pasti. Ma, al di là dell'incisività e piacevolezza dello stile e dell'arguzia polemica, *Il Saggiatore* vale soprattutto come operazione «di propaganda culturale, di rottura dei vecchi metodi» e come «richiamo... al dovere dello scienziato di ragionare in termini matematici per non lasciarsi ingannare dalla fantasia e non cadere in sofisticati equivoci». In tale ottica va letta la celeberrima pronuncia che viene in generale accolta come manifesto del pensiero galileiano:

Infinito

Nel dialogo si discute del concetto di grandezze infinitesime e grandezze finite, di cui Galileo avverte un'esigenza non astratta, bensì legata allo svolgimento di reali fenomeni fisici o alla soluzione di concreti problemi geometrici.

In particolare il caso della descrizione del moto accelerato, richiede chiaramente l'esigenza di grandezze infinitesime e, di conserva con esse, di operazioni da reiterare un numero infinito di volte.

Qui egli fa una diversione per rendere più comprensibili questi concetti, adottando come esempio quello dell'infinita divisibilità di un segmento geometrico finito in parti di lunghezza infinitesima. Nel

linguaggio galileiano, una grandezza finita e misurabile è detta «parte quanta» o «quanto», mentre l'infinitesimo viene denominato «non quanto» o «indivisibile».

Troveremo, nelle pagine che seguono, alcune curiose asserzioni che non appaiono giustificate e comunque non rientrano in quanto si apprende dalle scienze matematiche. Una di esse è la famosa corrispondenza tra l'infinito e l'unità, una visione di natura quasi mistica in cui Galileo si rifugia, sgomentato dall'immensità dei concetti.

Il dialogo, tratto dai *Discorsi*, costituisce un esercizio di logica brillante e acuta nel suo dipanarsi. Salviati appare qui al contrario irretito dalla vertigine di ciò che è incomprendibile «dal nostro intelletto finito», sia per l'infinita grandezza che per l'infinita piccolezza, e dalla seducente constatazione che esse si implicano vicendevolmente.

Galileo, tuttavia, è troppo lucido controllore delle proprie emozioni per identificarsi del tutto, come fa altrove, con il suo personaggio. Ecco quindi le reiterate prese di distanza da «questa fantasticheria... apportatrice di qualche meraviglia», da questi «umani capricci», da queste «cose arbitrarie e non necessarie».

Una fantasticheria

SIMPL. [...] In oltre, quel comporre la linea di punti, il divisibile di indivisibili, il quanto di non quanti, mi paiono scogli assai duri da passargli; e l'istesso dover ammettere il vacuo, tanto concludentemente reprovato da Aristotele, non manca delle medesime difficoltà.

SALV. Ci sono veramente coteste, e dell'altre: ma ricordiamoci che siamo tra gl'infiniti e gl'indivisibili, quelli incomprendibili dal nostro intelletto finito per la lor grandezza, e questi per la lor piccolezza. Con tutto ciò veggiamo che l'umano discorso non vuol rimanersi dall'aggirarsegli attorno; dal che pigliando io ancora qualche libertà, produrrei alcuna mia fantasticheria, se non concludente necessariamente, almeno, per la novità, apportatrice di qualche meraviglia. [...]

SALV. Avrò qualche mio pensiero particolare, replicando prima quel che poco fa dissi, cioè che l'infinito è per sé solo da noi incomprendibile, come anco gl'indivisibili; or pensate quel che saranno congiunti insieme: e pur se vogliamo compor la linea di punti indivisibili, bisogna fargli infiniti; e così conviene apprender nel medesimo tempo l'infinito e l'indivisibile.

È palese, nell'ultima frase di Salviati, l'intenzione di smussare la possibile portata «eretica» del suo libero pensiero. Egli passa ora ad argomentare il concetto sopra espresso che per formare un segmento geometrico finito con elementi indivisibili – ossia infinitesimi – occorre prenderli in numero infinito.

Tra le prime istanze che si sogliono produrre contro a quelli che compongono il continuo d'indivisibili, suol esser quella che uno indivisibile aggiunto a un altro indivisibile non produce cosa divisibile, perché, se ciò fusse, ne seguirebbe che anco l'indivisibile fusse divisibile; perché quando due indivisibili, come, per esempio, due punti, congiunti facessero una quantità, qual sarebbe una linea divisibile, molto più sarebbe tale una composta di tre, di cinque, di sette e di altre moltitudini dispari; le quali linee essendo poi segabili in due parti eguali, rendon segabile quell'indivisibile che nel mezzo era collocato. In questa ed altre obiezioni di questo genere si dà soddisfazione alla parte con dirgli, che non solamente due indivisibili, ma né dieci, né cento, né mille non compongono una grandezza divisibile e quanta, ma si bene infiniti.

Il trucco dei quadrati

SALV Io suppongo che voi benissimo sappiate quali sono i numeri quadrati, e quali i non quadrati. e sapete ancora, che sì come i prodotti si dimandano quadrati, i producenti, cioè quelli che si moltiplicano, si chiamano lati o radici; gli altri poi, che non nascono da numeri moltiplicati in se stessi, non sono altrimenti quadrati. Onde se io dirò, i numeri tutti, comprendendo i quadrati e i non quadrati, esser più che i quadrati soli, dirò proposizione verissima: non è così?

Interrogando io di poi, quanti siano i numeri quadrati, si può con verità rispondere, loro esser tanti quante sono le proprie radici, avvenga che ogni quadrato ha la sua radice, ogni radice il suo quadrato, né quadrato alcuno ha più d'una sola radice, né radice alcuna più d'un quadrato solo.

Ma se io domanderò, quante siano le radici, non si può negare che elle non siano quante tutti i numeri, poiché non vi è numero alcuno che non sia radice di qualche quadrato; e stante questo, converrà dire che i numeri quadrati siano quanti tutti i numeri, poiché tanti sono quante le lor radici, e radici son tutti i

numeri: e pur da principio dicemmo, tutti i numeri esser assai più che tutti i quadrati, essendo la maggior parte non quadrati. E pur tuttavia si va la moltitudine de i quadrati sempre con maggior proporzione diminuendo, quanto a maggior numeri si trapassa; perché sino a cento vi sono dieci quadrati, che è quanto a dire la decima parte esser quadrati; in dieci mila solo la centesima parte son quadrati, in un milione solo la millesima: e pur nel numero infinito, se concepir lo potessimo, bisognerebbe dire, tanti essere i quadrati quanti tutti i numeri insieme.

Io non veggo che ad altra decisione si possa venire, che a dire, infiniti essere tutti i numeri, infiniti i quadrati, infinite le loro radici, né la moltitudine de' quadrati esser minore di quella di tutti i numeri, né questa maggior di quella, ed in ultima conclusione, gli attributi di eguale maggiore e minore non aver luogo ne gl'infiniti, ma solo nelle quantità terminate.

NOTA FISICO-MATEMATICA

Nel calcolo infinitesimale la variazione infinitesima di una data grandezza – o sua parte infinitesimale, o parte elementare – è espressa dal differenziale della stessa. Nel caso di una lunghezza x , la sua variazione infinitesima è indicata con dx . Essa viene definita attraverso l'operazione di suddivisione della grandezza in parti sempre più piccole, fino al limite di un numero infinito di suddivisioni. L'infinitesimo di ordine due, immediatamente superiore, è dato da $(dx)^2$, cioè dal quadrato di dx , che rappresenta ovviamente l'area di un quadrato di lato dx . L'infinitesimo di ordine 3 è $(dx)^3$, ossia il volume del cubo di lato dx , e così via.

Procedendo in senso inverso, se è dato l'elemento infinitesimo di lunghezza dx , la lunghezza x del segmento finito si ottiene sommando tutti gli elementi dx contenuti in esso, che sono in numero infinito. Tale operazione rappresenta l'estensione di una sommatoria di termini finiti e si chiama *integrale*.

L'esigenza del concetto di differenziale nei problemi fisici è subito evidente quando si voglia esprimere matematicamente la velocità istantanea di un corpo. Si procede come segue. La figura rappresenta l'andamento nel tempo t dello spazio x percorso da un punto materiale (linea oraria). La velocità media in un intervallo finito, diciamo Δt , è data dal rapporto $\Delta x/\Delta t$, dove Δx è lo spazio percorso nel tempo Δt . Più piccolo è il Δt preso in considerazione, più la velocità media si avvicina a quella istantanea al tempo t . Occorre allora ridurre via via l'intervallo di tempo Δt , e corrispondentemente quello spaziale Δx , fino ai valori infinitesimi dt e dx . Tale operazione si chiama passaggio al limite per Δt tendente a zero. La velocità istantanea $v(t)$ si ottiene applicando il passaggio al limite al rapporto $\Delta x/\Delta t$ che esprime la velocità media:

Il Saggiatore: Il Metodo scientifico

Il gran libro della natura

[...] La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

Questo fondamentale concetto è alla base della nuova scienza, avviata da Galileo e dai grandi fisici del suo tempo, ma si trova già enunciato in Leonardo da Vinci. Il quale dice: «Nessuna umana investigazione si può dimandare vera scienza, s'essa non passa per le matematiche dimostrazioni».

Ruolo della matematica

La novità più importante nel pensiero di Galileo è la sistematica matematizzazione della natura. Matematizzazione da intendere nel senso di geometrizzazione, giacché in pratica egli non fa mai uso di formule, di algebra e persino di frazioni. La matematica è per lui semplicemente uno strumento della ragione che aiuta a non smarrirsi in vane fantasie.

Le parole di Galileo costituiscono un'esplicita dichiarazione di fiducia nella razionalità della natura e dell'uomo, e nella possibilità che ha quest'ultimo di decifrare e comprendere il reale, purché ne possieda il linguaggio. Le due metafore del libro aperto e dell'«*oscuro laberinto*» sono simboli rispettivamente del modo nuovo – rinascimentale e umanistico – e di quello antico – medievale e dogmatico – di porsi di fronte alla natura, nella quale l'uomo rischia di smarrirsi se si priva del filo di Arianna della ragione.

L'affermazione galileiana, con il ruolo determinante che riconosce alla matematica, costituisce, oggi ancor più di allora, il presupposto irrinunciabile del fare scienza: si può dire infatti che l'intreccio di scienza sperimentale, modelli teorici e metodologie matematiche, e la loro mutua opera di fertilizzazione, sono caratteri eminenti nella scienza contemporanea, tanto più marcati quanto più essa è progredita e ha raggiunto il livello della maturità.

E per quanto riguarda l'uomo comune, colui che non è scienziato, possiamo affermare, a tanti secoli di distanza, che le parole di Galileo fanno parte del patrimonio culturale di chi vive nei cosiddetti paesi civilizzati dell'Occidente? Purtroppo no. Basta cogliere brandelli di dialogo per strada, sfogliare i giornali, sbirciare la televisione, per accorgersi che non è così, che gli uomini – per ignoranza, pigrizia, paura, disinteresse – continuano ad appoggiarsi acriticamente alle opinioni di altri e ad aggirarsi in gran numero nel labirinto oscuro dei sensi, non ancora rischiarato dalla ragione.

Le qualità percepite

A proposito di matematizzazione della natura, *Il Saggiatore* contiene una breve parentesi, quasi una libertà che Galileo si concede nel discorso scientifico dominante, dove si precisa quali aspetti della natura il fisico matematico debba astenersi dall'investigare. Si tratta degli aspetti qualitativi, cioè di quelle proprietà secondarie degli oggetti, come i colori, i suoni, gli odori, i sapori, che non sono insite nelle cose stesse bensì nel soggetto percettore.

Compito del fisico è cercare le qualità primarie, cioè grandezza, figura, numero e movimento, che sono esprimibili quantitativamente e definibili in maniera oggettiva, così da divenire terreno di indagine scientifica.

È opportuno inoltre sottolineare che Galileo, nel fare la distinzione tra qualità fisiche e qualità psichiche, non si pose dal punto di vista del filosofo ma dello scienziato, ossia «con mentalità più operativa che non speculativa. In altri termini, fece arditamente appello ad essa, perché serviva alle sue indagini e nei limiti in cui era palese questa utilità», ma non si curò «di analizzarne i presupposti conoscitivi generali, perché quest'analisi era fuori dei suoi interessi».

A quasi quattro secoli di distanza, gli uomini non hanno ancora appreso questa lezione, e si crogiolano nelle ipotesi gratuite dell'astrologia, del mistero, dell'ufologia, del paranormale.

Tra gli argomenti trattati in queste pagine, di particolare rilievo è l'intuizione galileiana che debba sussistere una qualche interconnessione tra la sensazione di calore e il moto delle particelle della sorgente termica, e anche l'idea che luce e materia siano in certo modo facce di una stessa realtà. Veniamo ora al famoso passo sulle percezioni sensoriali.

Restami ora che io dica certo mio pensiero intorno alla proposizione «Il moto è causa di calore», mostrando in qual modo mi par ch'ella possa esser vera Ma prima mi fa di bisogno fare alcuna considerazione sopra questo che noi chiamiamo caldo, del qual dubito grandemente che in universale ne venga formato concetto assai lontano dal vero, mentre vien creduto essere un vero accidente affezione e qualità che realmente risegga nella materia dalla quale noi sentiamo riscaldarci.

Per tanto io dico che ben sento tirarmi dalla necessità, subito che concepisco una materia o sostanza corporea, a concepire insieme ch'ella è terminata e figurata di questa o di quella figura, ch'ella in relazione ad altre è grande o piccola, ch'ella è in questo o quel luogo, in questo o quel tempo, ch'ella si muove o sta ferma, ch'ella tocca o non tocca un altro corpo, ch'ella è una, poche o molte, né per veruna immaginazione posso separarla da queste condizioni; ma ch'ella debba essere bianca o rossa, amara o dolce, sonora o muta, di grato o ingrato odore, non sento farmi forza alla mente di doverla apprendere da cotali condizioni necessariamente accompagnata: anzi, se i sensi non ci fussero scorta, forse il discorso o l'immaginazione per sé stessa non v'arriverebbe già mai. Per lo che vo io pensando che questi sapori, odori, colori etc., per la parte del soggetto nel quale ci par che riseggano, non sieno altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale, sieno levate ed annichilate tutte queste qualità [...].

Ora, di simile e non maggiore essistenza credo io che possano esser molte qualità che vengono attribuite a i corpi naturali, come sapori, odori, colori ed altre.

[...] Ma che ne' corpi esterni, per eccitare in noi i sapori, gli odori e i suoni, si richiegga altro che grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci, io non lo credo; e stimo che, tolti via gli orecchi le lingue e i nasi, restino bene le figure i numeri e i moti, ma non già gli odori né i sapori né i suoni, li quali fuor dell'animal vivente non credo che sieno altro che nomi, come a punto altro che nome non è il solletico e la titillazione, rimosse l'ascelle e la pelle intorno al naso.

Natura del calore

E tornando al primo mio proposito in questo luogo, [...] dico che inclino assai a credere che il calore sia di questo genere, e che quelle materie che in noi producono e fanno sentire il caldo, le quali noi chiamiamo con nome generale fuoco, siano una moltitudine di corpicelli minimi, in tal tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità; li quali, incontrando il nostro corpo, lo penetrino con la lor somma sottilità, e che il lor toccamento, fatto nel lor passaggio per la nostra sostanza e sentito da noi, sia l'affezione che noi chiamiamo caldo, grato o molesto secondo la moltitudine e velocità minore o maggiore d'essi minimi che vanno pungendo e penetrando, sì che grata sia quella penetrazione per la quale si agevola la nostra necessaria insensibil traspirazione, molesta quella per la quale si fa troppo gran divisione e risoluzione¹⁷ nella nostra sostanza: sì che in somma l'operazion del fuoco per la parte sua non sia altro che, movendosi, penetrare colla sua massima sottilità tutti i corpi, dissolvendogli più presto o più tardi secondo la moltitudine e velocità de gl'ignicoli¹⁸ e la densità o rarità della materia d'essi corpi; de' quali corpi molti ve ne sono de' quali, nel lor disfacimento, la maggior parte trapassa in altri minimi ignei, e va seguitando la risoluzione fin che incontra materie risolubili. Ma fa che oltre alla figura, moltitudine, moto, penetrazione e toccamento, sia nel fuoco altra qualità, e che questa sia caldo, io non lo credo altrimenti; e stimo che questo sia talmente nostro, che, rimosso il corpo animato e sensitivo, il calore non resti altro che un semplice vocabolo

Luce e materia

Ora, la confricazione e stropicciamento di due corpi duri, o col risolverne parte in minimi sottilissimi e volanti, o coll'aprir l'uscita a gl'ignicoli contenuti, gli riduce finalmente in moto, nel quale incontrando i nostri corpi e per essi penetrando e scorrendo, e sentendo l'anima sensitiva nel lor passaggio i toccamenti, sente quell'affezione grata o molesta, che noi poi abbiamo nominata caldo, bruciore o

scottamento. E forse mentre l'assottigliamento e attrizione resta e si contiene dentro a i minimi quanti, il moto foro è temporaneo, e la lor operazione calorifica solamente; che poi arrivando all'ultima ed altissima risoluzione in atomi realmente indivisibili, si crea la luce, di moto o vogliamo dire espansione e diffusione istantanea, e potente per la sua, non so s'io debba dire sottilità, rarità, immaterialità, o pure altra condizion diversa da tutte queste ed innominata, potente, dico, ad ingombrare spazii immensi.

Velocità della luce

Galileo affronta il problema se la luce si propaghi in modo istantaneo oppure necessiti di un appropriato intervallo di tempo per passare dalla sorgente che la emette al punto dove si trova l'osservatore. Sulle distanze terrestri, questo chiarimento non si è reso possibile prima dell'avvento di sofisticate tecniche ottiche di laboratorio, e in particolare quelle attuali, estremamente precise, basate sull'impiego dei laser.

Galileo suggerisce un esperimento in cui due amici, muniti di lampade, si collocano ad alcuni chilometri di distanza l'uno dall'altro. Il primo, a un dato istante, scopre la sua lampada; il secondo, non appena vede la luce, scopre la propria. Il primo ha il compito di valutare il ritardo che intercorre tra il momento in cui ha inviato la luce e il momento in cui gli perviene quella di ritorno. Esperimento del tutto inadeguato, evidentemente dato che vi si ignorano perlomeno i tempi di reazione degli sperimentatori, che sono già ben maggiori dei tempi di percorrenza del segnale luminoso. Ciò indica come Galileo non abbia la benché minima idea di quanto elevata sia la velocità della luce, che egli probabilmente reputa sì alquanto maggiore di quella del suono, ma pur sempre in qualche modo ad essa comparabile.

(misura-velocità-luce)

Ombre minacciose

Nel febbraio del 1632 esce, munito di *imprimatur* ecclesiastico, il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, ma già nell'agosto dello stesso anno corre voce che ci sia «qualche riflessione sopra il detto libro per correggerlo o sospenderlo, o forse proibirlo». In agosto ne viene vietata la diffusione e il papa nomina una commissione speciale perché lo esamini. In settembre il Dialogo viene sottoposto alla Congregazione del Sant'Uffizio e in ottobre Galileo, gravemente sospetto di eresia, è convocato a Roma per difendersi. Che cosa è successo, in questo breve lasso di tempo, che giustifichi un tanto rapido precipitare degli eventi?

Urbano VIII, il papa già amico e benefattore di Galileo, è stato accusato dai cardinali spagnoli di simpatie filofrancesi e soprattutto di compiacenza nei confronti della Svezia eretica di Gustavo Adolfo. Quasi isolato, e minacciato di deposizione dai più intransigenti dei suoi nemici, deve poter dimostrare di essere un efficace difensore dei valori della Chiesa restaurata. Inoltre, sul piano personale, egli è «in molta collera» con Galileo in quanto il suo argomento, il cosiddetto argomento di Urbano VIII appunto, è stato sì inserito a chiusura del *Dialogo*, ma posto sulle labbra dell'ingenuo Simplicio. È da ricercarsi nelle due motivazioni indicate, oltre che nella mai sopita ostilità dei potenti gesuiti, la causa del deferimento di Galileo al Tribunale dell'Inquisizione.

L'epistolario ben documenta, fin dalle prime avvisaglie del pericolo imminente, la viva preoccupazione degli amici di Galileo. Il fitto intrecciarsi delle loro lettere testimonia i passi compiuti per saggiare gli umori del papa, i consulto sul da farsi, le parole di conforto e di incoraggiamento offerte a Galileo. Il quale inizialmente sembra essere il meno allarmato di tutti, al punto da abbandonarsi a una polemica con il devoto allievo Cavalieri, piuttosto che correre ai ripari. Ma forse proprio l'attacco all'amico – Galileo riconoscerà presto di avere ecceduto – è spia di un disagio più vasto e profondo. Egli si sente vittima di una congiura dovuta all'invidia ed è avvilito al punto di pensare di bruciare i propri libri. Prende tempo, spera di poter essere interrogato dall'Inquisitore di Firenze.

Nel tentativo di poter almeno rinviare il viaggio a Roma, scrive una lettera al cardinale Francesco Barberini, che così si conclude: «... quando né la grave età, né le molte corporali indisposizioni, né afflizioni di mente, né la lunghezza di un viaggio per i presenti sospetti [di peste] travagliosissimo siano giudicate da cotesto sacro et eccelso Tribunale scuse bastanti ad impetrar dispensa o proroga alcuna, io mi porrò in viaggio, antepoendo l'ubbidire al vivere». Ma poiché è avvertito che il suo temporeggiare rischia di essere interpretato per volontà di sottrarsi al giudizio e quindi di ritorcersi a suo danno, il 20 gennaio – dopo aver redatto testamento – si mette finalmente in viaggio per Roma.

L'inverno è molto rigido, la peste – quella stessa che il Manzoni descrive e che tante morti ha fatto a Milano – serpeggia ora nelle campagne dell'Italia centrale. Roma teme il contagio, i viandanti sono soggetti a quarantena, le merci e la posta vengono affumicate alle porte della città. Non è difficile immaginare lo sgomento che pervade l'animo di Galileo, il conflitto tra timori e speranze, la delusione che la sua lunga battaglia non abbia scalfito l'intransigenza anticopernicana della Chiesa. E anche forse il rimpianto di aver lasciato, a suo tempo, la Repubblica Veneta, da dove l'amico Fulgenzio Micanzio gli scrive: «... qui... certo non le saria fatto torto». Il 13 febbraio, dopo aver trascorso alcuni giorni di quarantena, giunge finalmente a Roma.

È la prima domenica di quaresima e Galileo è affranto. Ma si ostina a voler credere «che sul fatto alle ragioni ciedono per forza le chimere degli ignoranti», e lo conforta il pensiero che «quelle cose che tendono all'immortalità non hanno a temere la burrasca dei tempi». In attesa del processo, che avrà inizio il aprile, gli è concesso di soggiornare nella residenza dell'ambasciatore fiorentino, piuttosto che nelle celle del palazzo del Sant'Uffizio.

ABIURA

Io Galileo, fig.lo del q. Vinc.o Galileo di Fiorenza, dell'età mia d'anni 70, costituito personalmente in giuditio, et inginocchiato avanti di voi Emin.mi et Rev.mi Cardinali, in tutta la Repubblica Cristiana contro l'heretica pravità generali Inquisitori; havendo davanti gl'occhi miei li sacrosanti Vangeli, quali tocco con le proprie mani, giuro che sempre ho creduto, credo adesso, e con l'aiuto di Dio crederò per

l'avvenire, tutto quello che tiene, predica et insegna la S.a Cattolica e Apostolica Chiesa. Ma perché da questo S. Off.o, per haver io, dopo d'essermi stato con precetto dall'istesso giuridicamente intimato che omninamente dovessi lasciar la falsa opinione che il sole sia centro del mondo e che non si muova e che la terra non sia centro del mondo e che si muova, e che non potessi tenere, difendere né insegnare in qualsivoglia modo, né in voce né in scritto, la detta falsa dottrina, e dopo d'essermi notificato che detta dottrina è contraria alla Sacra Scrittura, scritto e dato alle stampe un libro nel quale tratto l'istessa dottrina già dannata et apporto ragioni con molta efficacia a favor di essa, senza apportar alcuna solutione, sono stato giudicato vehementemente sospetto d'heresia, cioè d'haver tenuto e creduto che il sole sia centro del mondo et immobile e che la terra non sia centro e che si muova;

Pertanto volendo io levar dalla mente delle Eminenze V.re e d'ogni fedel Cristiano questa vehemente sospitione, giustamente di me conceputa, con cuor sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li sudetti errori et heresie, e generalmente ogni et qualunque altro errore, heresia e setta contraria alla S.ta Chiesa; e giuro che per l'avvenire non dirò mai più né asserirò, in voce o in scritto, cose tali per le quali si possa haver di me simil sospitione; ma se conoscerò alcun heretico o che sia sospetto d'heresia lo denontiarò a questo S. Offitio, o vero all'Inquisitore o Ordinario del luogo, dove mi trovarò.

Giuro anco e prometto d'adempire et osservare intieramente tutte le penitenze che mi sono state o mi saranno da questo S. Off.o imposte; e contravenendo ad alcuna delle dette mie promesse e giuramenti, il che Dio non voglia, mi sottometto a tutte le pene e castighi che sono da' sacri canoni e altre constitutioni generali e particolari contro simili delinquenti imposte e promulgate.

Così Dio m'aiuti e questi suoi santi Vangeli, che tocco con le proprie mani.

Io Galileo Galilei sodetto ho abiurato, giurato, promesso e mi sono obligato come sopra; et in fede del vero, di mia propria mano ho sottoscritta la presente cedola di mia abiuratione e recitatala di parola in parola, in Roma, nel convento della Minerva, questo dì 22 giugno 1633.

Io, Galileo Galilei ho abiurato come di sopra, mano propria.

[Si allega una trasposizione della vita di Galileo, costruita soprattutto sull'Epistolario, che può vedere gli studenti come protagonisti] (galileo-teatro + galileo_pp)

BIBLIOGRAFIA

M. Bucciantini, M. Camerota, F. Giudice: Il telescopio di Galileo – Einaudi

M. Bucciantini: Galileo e Keplero – Einaudi

John Heilbron: Galileo – scienziato e umanista – Einaudi

Ludovico Geymonat: Galileo Galilei – Einaudi

Opere di Galileo (ci sono numerose versioni)

A. Frova, M. Marenzana: Parola di Galileo – Bur

B. Brecht: Vita di Galileo – Einaudi Scuola

APPENDICE

CAPITOLO CONTRO IL PORTAR LA TOGA

Mi fan patir costoro il grande stento,
Che vanno il sommo bene investigando,
E per ancor non v'hanno dato drento.
E mi vo col cervello immaginando,
Che questa cosa solamente avviene
Perchè non è dove lo van cercando.
Questi dottor non l'han mai intesa bene,
Mai son entrati per la buona via,
Che gli possa condurre al sommo bene.
Perchè , secondo l'opinion mia,
A chi vuol una cosa ritrovare,
Bisogna adoperar la fantasia,
E giocar d'invenzione, e 'ndovinare;
E se tu non puoi ire a dirittura,
Mill'altre vie ti posson aiutare.
Questo par che c'insegni la natura,
Che quand'un non può ir per l'ordinario,
Va dret'a una strada più sicura.
Lo stil dell'invenzione è molto vario;
Ma per trovar il bene io ho provato
Che bisogna proceder pel contrario:
Cerca del male, e l'hai bell'e trovato;
Però che 'l sommo bene e 'l sommo male
S'appaion com'i polli di mercato.
Quest'è una ricetta generale:
Chi vuol saper che cosa è l'astinenza;
Trovì prima che cosa è 'l carnevale,
E ponga tra di lor la differenza;
E volendo conoscer i peccati,
Guardi se 'l prete gli dà penitenza;
E se tu vuo' conoscer gli sciaurati,
Omacci tristi e senza descrizione,
Basta che tu conosca i preti e' frati,
Che son tutti bontà e divozione:
E questa via ci fa toccar il fondo,
E sciogl'il nodo alla nostra questione.
Io piglio un male a null'altro secondo,
Un mal che sia cagion de gli altri mali,
Il maggior mal che si trovi nel mondo;
Il quale ognun che vede senz'occhiali,
Che sia l'andar vestito, tien per certo;
Questo lo sanno in sino gli animali,
Che vivono spogliati e allo scoperto;
E sia pur l'aria calda o 'l tempo crudo,

Non istan mai vestiti o al coperto.
 Volgo poi l'argomento, e ti conchiudo,
 E ti fo confessare a tuo dispetto,
 Che 'l sommo ben sarebbe andare ignudo.
 E perchè vegghi che quel ch'io ho detto
 È chiaro e certo e sta com'io lo dico,
 Al senso e alla ragion te ne rimetto.
 Volgiti a quel felice tempo antico,
 Privo d'ogni malizia e d'ogni inganno,
 Ch'ebbe sì la natura e 'l cielo amico;
 E troverai che tutto quanto l'anno
 Andava nud'ognun, picciol e grande,
 Come dicon i libri che lo sanno.
 Non ch'altro, e' non portavon le mutande,
 Ma quant'era in altrui di buono o bello
 Stava scoperto da tutte le bande.
 E così ognun, secondo il suo cervello,
 Coloriva e 'ncarnava il suo disegno,
 Secondo che gettava il suo pennello;
 Nè bisognava affaticar l'ingegno
 A strolagar per via d'architettura,
 O 'ndovinar da qualche contrassegno:
 Non occorre andar per cognettura,
 Perchè la roba stava in su la mostra,
 E si vendeva a peso e a misura.
 E quest'è la ragion che ci dimostra
 Ch'allor non eron gl'inconvenienti,
 Che si veggon seguire all'età nostra.
 Quella sposa si duol co' suo' parenti,
 Perchè lo sposo è troppo mal fornito,
 E non ci vuole star sotto altrimenti;
 Ma dice che ci piglierà partito,
 E che gli han dato colui a malizia,
 Tal che gli è forza cambiarle marito.
 Altri, che di ben sodi ha gran dovizia,
 Talor dà in una ch'ha sì poca entrata,
 Che non v'è da ripor la masserizia.
 Così resta la sposa sconsolata:
 Gli è ver che questo non avvien sì spesso;
 Pur di queste qualcuna s'è trovata:
 Dov'allor si vedeva a un di presso,
 Innanzi che venissino alle prese,
 La proporzion tra l'uno e l'altro sesso.
 Non si temeva allor del mal francese:
 Però che, stand'ignudo alla campagna,
 S'un avea qualche male, era palese;
 E s'una donna avea qualche magagna,
 La teneva coperta solamente

Con tre o quattro foglie di castagna.
 Così non era gabbata la gente,
 Come si vede che l'è gabbat'ora,
 Se già l'uomo non è più ch'intendente:
 Chè tal par buona, veduta di fuori,
 Che se tu la ricerchi sotto panno,
 La trovi come 'l vaso di Pandora.
 E così d'ogni frode e d'ogn'inganno
 Si vede chiaro che n'è sol cagione
 L'andar vestito tutto quanto l'anno.
 Un'altra, e non minor, maladizione
 Nasce tra noi di questa ria semenza,
 Che tien il mondo in gran confusione:
 Quest'è la maggioranza e preminenza
 Che vien da' panni bianchi, oscuri o persi,
 Che pongon tra' Cristian la differenza.
 Questa pospone a i monaci i conversi,
 Antepon l'oste a i suoi lavoratori,
 E da i padron fa i sudditi diversi:
 Dov'in que' tempi non eran signori,
 Conti, marchesi o altri bacalari,
 Nè anche poveracci o servidori.
 Tutti quanti eron uomini ordinari,
 Ognun si stava ragionevolmente,
 Eron tutti persone nostre pari,
 E ciascun del compagno era parente;
 Se non era parente, gli era amico;
 Se non amico, al manco conoscente.
 Credi pur ch'ella sta com'io ti dico,
 Che 'l vestir panni e simil fantasie
 Son tutte quante invenzion del Nimico;
 Come fu quella dell'artiglierie,
 E delle streghe e dello spiritare,
 E degli altri incantesimi e malie.
 Un'altra cosa mi fa strabiliare,
 E sto per dirti quasi ch'io c'impazzo,
 Nè so trovar com'ella possa stare:
 Ed è, che se qualcun per suo sollazzo,
 Sendo 'ngegnoso e alto di cervello,
 Talor va ignudo, e' dicon che gli è pazzo:
 I ragazzi gli gridan: Véllo, véllo;
 Chi gli fa pulce secche e chi lo morde,
 Traggongli sassi e fannogli il bordello;
 Altri lo vuol legar con delle corde,
 Come se l'uomo fusse una vitella:
 Guarda se le persone son balorde!
 E se tu credi che questa sia bella,
 E' bisogna che 'n cielo, al parer mio,

Regni qualche pianeta o qualche stella.
 Però se vuol così Domenedio,
 Che finalmente può far ciò che vuole,
 Io son contento andar vestito anch'io,
 E non ci starò a far altre parole:
 Andrommen'anch'io dietro a questa voga;
 Ma Dio sa lui, se me n'incresce e duole!
 Ma ch'io sia per voler portar la toga,
 Come s'io fussi qualche Fariseo,
 O qualche scriba o archisinagoga,
 Non lo pensar; ch'io non son mica Ebreo,
 Se bene e' pare al nome e al casato
 Ch'io sia disceso da qualche Giudeo.
 I' sto a veder se 'l mondo è spiritato,
 Se egli è uscito del cervello affatto,
 E s'egli è desto, o pure addormentato;
 E s'egli è vero ch'un che non sia matto
 Non arrossisca che gli sia veduto
 Un abito sì sconcio e contraffatto.
 In quant'a me mi son ben risoluto,
 Ch'io non ne voglio intender più sonata:
 Mi contento del mal ch'io n'ho già auto;
 E perchè non paresse alla brigata,
 Ch'io mi movessi senz'occasione,
 Come fan quegli ch'han poca levata,
 Io son contento dir la mia ragione,
 E che tu stesso la sentenza dia:
 So che tu hai giudizio e discrezione.
 La prima penitenza che ci sia
 (Guarda se per la prima ti par nulla),
 È ch'io non posso fare i fatti mia,
 Come sarebbe andar alla fanciulla;
 Ma mi tocca a restar fuor della porta,
 Mentre ch'un altro in casa si trastulla.
 Dicon ch'è grave errore, e troppo importa,
 Ch'un dottor vadia a casa le puttane:
 La togal gravità non lo comporta.
 E 'l veder queste cose così strane
 Mi fa poi far qualch'altro peccatuccio,
 E bene spesso adoperar le mane:
 Onde costor, che si pigliano impaccio
 Della mia salvazione e del mio bene,
 Bravano e gridan ch'io non ne fo straccio.
 A un che vada in toga non conviene
 Il portar un vestito che sia frusto,
 A voler che la cosa vadia bene;
 Perchè, mostrando tutto quanto il fusto
 E la persona giù lunga e distesa,

Egli è forza ch'ei faccia il bellombusto:
 E così viene a raddoppiar la spesa;
 E questa a chi non ha molti quattrini
 È una dura e faticosa impresa.
 Non ci vuol tanti rasi ed ermisini,
 Quando tu puoi portare il ferraiuolo:
 Basta aver buone scarpe e buon calzini;
 Il resto, quando sia di romagnuolo,
 Non vuol dir nulla, se ben par che questa
 Sia una sottigliezza da Spagnuolo:
 E non importa che tu ti rivesta,
 Mutand'abiti e foggie a tutte l'ore,
 Se è dì di lavoro o dì di festa.
 Se per disgrazia un povero dottore
 Va per la strada in toga scompagnato,
 Par quasi ch'e' ci metta dell'onore;
 E se non è da venti accompagnato,
 Mi par sempre sentir dir le brigate:
 “Colui è un ignorante e smemorato”:
 Tal che sarebbe meglio a farsi frate;
 Ch'al manco vanno a coppie, e non a serque,
 Come van gli spinaci e le granate.
 Però chi dice lor: *Beati terque*,
 Non dice ancor quanto si converrebbe,
 E sarie poco a dir *terque quaterque*;
 Dove ch'a un dottor bisognerebbe
 Dargli la mala Pasqua col mal anno,
 A voler far quel ch'ei meriterebbe.
 Non so com'ei non crepi dell'affanno,
 Quand'egli ha intorn'a sè diciott'o venti,
 Che, per udirlo, a bocca aperta stanno.
 A me non par egli essere altrimenti,
 Che sia tra i pettirossi la civetta,
 O la Misericordia tra' Nocenti;
 E n'ho aut'a' miei dì più d'una stretta:
 E però, toga, va' pur in buon'ora,
 Vatten'in pace, che sie benedetta.
 Ma quand'anche un dottore andasse fuora,
 E ch'andar solo pur gli bisognassi,
 Come si vede che gli avvien talora,
 Tu non lo vedi andar se non pe' chiassi,
 Per la vergogna, o ver lungo le mura,
 E 'n simil altri luoghi da papassi:
 E par ch'e' fugga la mala ventura;
 Volgesi or da man manca or da man destra,
 Com'un che del bargello abbia paura:
 Par una gatta in una via maestra,
 Che sbalordita fugga le persone,
 Quand'è cascata giù dalla finestra,

Che se ne corre via carpon carpone,
Tanto ch'ella s'imbuchi in qualche volta,
Perchè gli spiace la conversazione.

Se tu vai fuor per far qualche faccenda,
Se tu l'hai a far innanzi desinare,
Tu non la fai che gli è or di merenda,
Perchè la toga non ti lascia andare,
Ti s'attraversa, t'impaccia e t'intrica,
Ch'è uno stento a poter camminare.

E però non par ch'ella si disdica
A quei che fanno le lor cose adagio
E non han troppo a grado la fatica,
Anzi han per boto lo star sempre in agio,
Come dir frati o qualche prete grasso,
Nimici capital d'ogni disagio,

Che non vanno mai fuor se non a spasso,
Come diremmo noi, a cercar funghi,
E se la piglian così passo passo.

A questi stanno bene i panni lunghi,
E non a un mie par, che bene spesso
Ho a correr perch'un birro non mi giunghi;

E ho sempre paura di qualche messo,
O che 'l Provveditor non mi condanni,
Ch'a dire il vero è un vituperio espresso.

Però, prima ch'usar più questi panni,
Vo' rinunziar la cattedra a Ser Piero,
E se non la vuol lui, a Ser Giovanni.

Io vo' che noi facciamo a dir il vero:
Che crediam noi però però ch'importi
Aver la toga di velluto nero,

E un che dreto il ferraiuol ti porti,
E che la notte poi ti vadia avanti
Con una torcia, come si fa a' morti ?

Sappi che questi tratti tutti quanti
Furon trovati da qualcuno astuto,
Per dar canzone e pasto agl'ignoranti,

Che tengon più valente e più saputo
Questo di quel, secondo ch'egli arà
Una toga di rascia o di velluto.

Dio sa poi lui come la cosa sta!
Ma s'io avessi a dire il mio parere,
Questo discorso un tratto non mi va.

Ch'importa aver le vesti rotte o intere,
Che gli uomini sien Turchi o Bergamaschi,
Che se gli dia del Tu o del Messere?

La non istà ne' rasi o ne' dommaschi;
Anzi vo' dirti una mia fantasia,

Che gli uomini son fatti com'i fiaschi.
Quando tu vai la state all'osteria,
Alle Bertuccionie, al Porco, a Sant'Andrea,
Al Chiassolino o alla Malvagia,
Guarda que' fiaschi, innanzi che tu bea
Quel che v'è drento; io dico quel vin rosso,
Che fa vergogna al greco e alla verdea:
Tu gli vedrai che non han tanto in dosso,
Che 'l ferravecchio ne dessi un quattrino;
Mostran la carne nuda in sino all'osso:
E poi son pien di sì eccellente vino,
Che miracol non è se le brigate
Gli dan del glorioso e del divino.
Gli altri, ch'han quelle veste delicate,
Se tu gli tasti, o son pieni di vento,
O di belletti o d'acque profumate,
O son fiascacci da pisciarvi drento.