



Storia e filosofia della scienza

Prof. Marcello Pelillo

(a.a. 2008/09)

La nuova fisica: Da Galileo a Newton



Ostacoli epistemologici

« Si può tentare di elencare una serie di convinzioni dalle quali fu necessario faticosamente distaccarsi perché giungesse a costituirsi la cosiddetta “fisica classica” di Galilei e Newton. [...] »

1. I corpi cadono perché sono pesanti, perché tendono cioè al loro *luogo naturale*, che è posto al centro dell’universo. [...]
2. Il mezzo attraverso il quale si muove un corpo è un elemento essenziale del fenomeno movimento, del quale è necessario tener conto nel determinare la velocità della caduta dei gravi. [...]
3. Poiché tutto ciò che si muove è mosso da qualcosa d’altro [...], il moto violento di un corpo è prodotto da una forza che agisce su di esso. »

Paolo Rossi, *La nascita della scienza moderna in Europa* (1991)



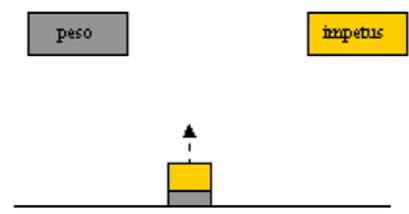
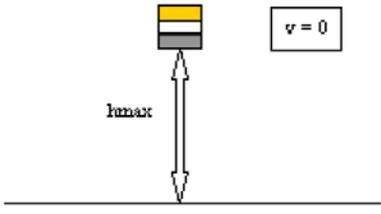
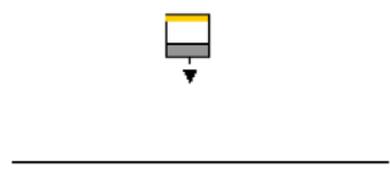
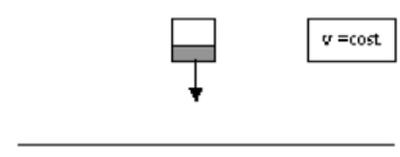
La teoria dell'*impetus*

« Ogniqualvolta qualche agente mette in moto un corpo, esso gli impartisce un certo *impetus*, una certa potenza che è capace di muovere il corpo lungo la direzione impostagli fin dall'inizio, che sia verso l'alto, verso il basso, verso il lato o su un cerchio. Quanto più è grande la velocità che è impressa al corpo dall'agente, tanto più sarà potente l'*impetus* che gli sarà dato. È questo *impetus* che muove una pietra dopo che è stata scagliata e fino a che il moto giunge alla fine. Ma a causa della resistenza dell'aria e anche a causa della pesantezza, che inclina il moto della pietra in una direzione differente da quella in cui l'*impetus* è efficace, questo *impetus* decresce continuamente. Di conseguenza il moto della pietra rallenta senza interruzione. In definitiva, l'*impetus* è vinto e distrutto nel punto in cui la gravità lo domina, e da quel momento in poi quest'ultima muove la pietra verso il suo luogo naturale. »

Giovanni Buridano (ca. 1290–1358)

Quaestiones octavi libri physicorum



<p>1.</p> <p>L'impetus o leggerezza trasferita al mobile dal motore, maggiore della sua pesantezza "naturale", determina il moto ascendente.</p>	
<p>2.</p> <p>Salendo l'impetus si consuma, la velocità diminuisce sino ad annullarsi alla quota massima; in questo punto la leggerezza uguaglia la pesantezza.</p>	
<p>3.</p> <p>La prima fase della discesa risulta accelerata in quanto la leggerezza residua ritarda lo stabilirsi del moto uniforme.</p>	
<p>4.</p> <p>Esaurito completamente l'impetus il moto diventa uniforme e la velocità di regime è proporzionale al peso specifico relativo del corpo:</p>	



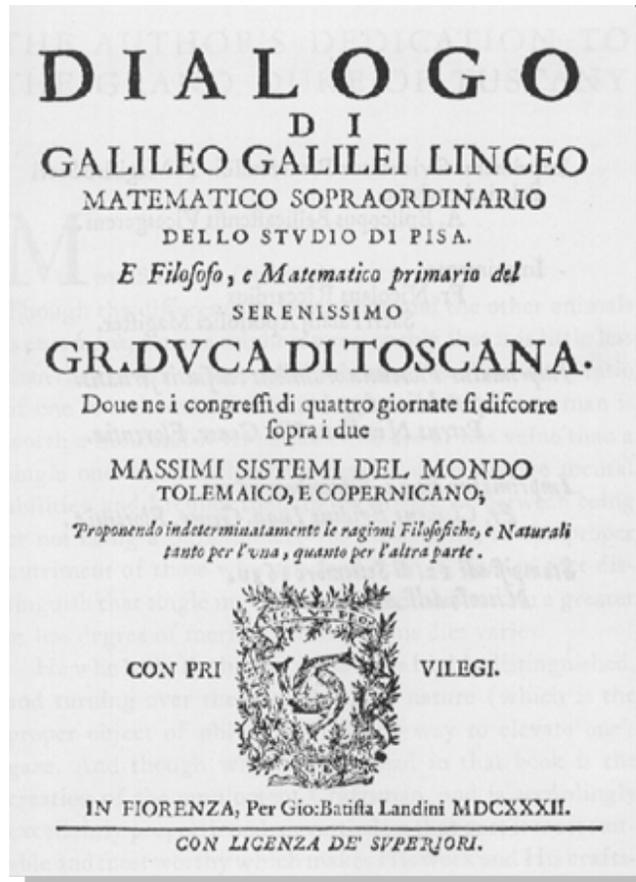
La fisica di Galileo

« Di tutti gli ostacoli intellettuali che la mente umana ha affrontato e superato negli ultimi mille cinquecento anni, quello che riguarda il problema del moto mi sembra il più stupefacente per le sue caratteristiche e il più meraviglioso per la portata delle sue conseguenze»

Herbert Butterfield, *Le origini della scienza moderna* (1958)



Il Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (1632)





Sommario delle quattro giornate

« Tre capi principali si tratteranno.

Prima cercherò di mostrare, tutte l'esperienze fattibili nella Terra essere mezzi insufficienti a concluder la sua mobilità, ma indifferentemente potersi adattare così alla Terra mobile, come anco quiescente; e spero che in questo caso si paleseranno molte osservazioni ignote all'antichità.

Secondariamente si esamineranno li fenomeni celesti, rinforzando l'ipotesi copernicana come se assolutamente dovesse rimaner vittoriosa, aggiungendo nuove speculazioni, le quali però servano per facilità d'astronomia, non per necessità di natura.

Nel terzo luogo proporrò una fantasia ingegnosa. Mi trovavo aver detto, molti anni sono, che l'ignoto problema del flusso del mare potrebbe ricever qualche luce, ammesso il moto terrestre. Questo mio detto, volando per le bocche degli uomini, aveva trovato padri caritativi che se l'adottavano per prole di proprio ingegno. Ora, perché non possa mai comparire alcuno straniero che, fortificandosi con l'armi nostre, ci rinfacci la poca avvertenza in uno accidente così principale, ho giudicato palesare quelle probabilità che lo renderebbero persuasibile, dato che la Terra si movesse. »



Il dialogo e i suoi personaggi

Ho poi pensato tornare molto a proposito lo spiegare questi concetti in forma di dialogo, che, per non esser ristretto alla rigorosa osservanza delle leggi matematiche, porge campo ancora a digressioni, tal ora non meno curiose del principale argomento.

Mi trovai, molt'anni sono, più volte nella meravigliosa città di Venezia in conversazione col signor **Giovan Francesco Sagredo**, illustrissimo di nascita, acutissimo d'ingegno. Venne là di Firenze il signor **Filippo Salviati**, nel quale il minore splendore era la chiarezza del sangue e la magnificenza delle ricchezze; sublime intelletto, che di niuna delizia più avidamente si nutriva, che di specolazioni esquisite.

Con questi due mi trovai spesso a discorrer di queste materie, con l'intervento di un filosofo peripatetico, al quale pareva che niuna cosa ostasse maggiormente per l'intelligenza del vero, che la fama acquistata nell'interpretazioni Aristoteliche.



Contro il moto della terra: la pietra e la nave

SALVIATI. [...] Voi dite: «Perché, quando la nave sta ferma, il sasso cade al piè 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'argumenta 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?

[...]

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

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



La prova “deduttiva”

SALVIATI. **Io senza esperienza son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perché così è necessario che segua;** e piú 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.

[...] 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, verbigravia, di bronzo, lasciata in sua libertà che credete voi che ella facesse? **Non credete voi (sí come credo io) che ella stesse ferma?**

SIMPLICIO. Se quella superficie fusse inclinata?

SALVIATI. Sí, ché così già ho supposto.

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



Verso il basso

SALVIATI. 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.

SIMPLICIO. 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.



Verso l'alto

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

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

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

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



Né in alto né in basso

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

SIMPLICIO. 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. [...]



Dandogli una spinta

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

SIMPLICIO. Seguirebbe il muoversi verso quella parte.

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

SIMPLICIO. Io non ci so scorgere causa di accelerazione né di ritardamento, non vi essendo né declività né acclività.

SALVIATI. 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?

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

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

SIMPLICIO. Parmi di sí, quando il mobile fusse di materia da durare.



Inerzia... ma circolare!

SALVIATI. Ditemi ora: quale stimate voi la cagione del muoversi quella palla spontaneamente sul piano inclinato, e non, senza violenza, sopra l'elevato?

SIMPLICIO. 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.

SALVIATI. **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?

SIMPLICIO. Non ve ne mancano: ècci 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.



Torniamo alla pietra sulla nave ...

SALVIATI. 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.

SIMPLICIO. Par che deva esser così.

SALVIATI. 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?

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

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



La spiegazione

SIMPLICIO. 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 il moto novello del cadere a basso, che pur bisogna che sia d'impedimento all'altro progressivo.



L'inerzia cartesiana

« E poiché ... pensiamo che è necessaria maggiore azione per il movimento che per il riposo, osserveremo qui che siamo caduti in questo errore fin dall'inizio della nostra vita... E come questa pesantezza, e molte altre cause che non siamo abituati a percepire, resistono al movimento delle nostre membra e fanno sì che ci stanchiamo, ci è sembrato che ci volesse una forza più grande e più azione per produrre un movimento che per fermarlo»



Cartesio, *Principia philosophiae*, II, 26 (1644)



Il principio di relatività: navi, mosche, farfalle

SALVIATI. [...] **Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio**, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: **e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza**; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non piú gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti.



La nave si muove

Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder cosí, **fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma:**

[...]

E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che per ciò dissi io che si stesse sotto coverta; ché quando si stesse di sopra e nell'aria aperta e non seguace del corso della nave, differenze piú e men notabili si vedrebbero in alcuni de gli effetti nominati:



Galileo e la Chiesa

« leggendosi nelle Sacre lettere, in molti luoghi, che il Sole si muove e che la Terra sta ferma, né potendo la Scrittura mai mentire o errare, ne sèguita per necessaria conseguenza che erronea e dannanda sia la sentenza di chi volesse asserire, il Sole esser per sé stesso immobile, e mobile la Terra. »

Lettera di Galileo alla Granduchessa Cristina di Lorena, 1615





Salvare i fenomeni

« mi pare che V. P. et il Sig.r Galileo facciano prudentemente a contentarsi di parlare *ex suppositione* e non assolutamente, come io ho sempre creduto che abbia parlato il Copernico.

Perchè il dire, che supposto che la terra si muova et il sole stia fermo si salvano tutte l'apparenze meglio che con porre gli eccentrici et epicicli, è benissimo detto, e non ha pericolo nessuno; e questo basta al mathematico:

ma volere affermare che realmente il sole stia nel centro del mondo, e solo si rivolti in sè stesso senza correre dall'oriente all'occidente, e che la terra stia nel 3o cielo e giri con somma velocità intorno al sole, è cosa molto pericolosa non solo d'irritare tutti i filosofi e theologi scholastici, ma anco di nuocere alla Santa Fede con rendere false le Scritture Sante »



Roberto Bellarmino a Paolo Antonio Foscarini

Roma, 12 aprile 1615



La sentenza (Roma, 22 giugno 1633)

« Diciamo, pronunziamo sentenziamo e dichiaramo che tu, Galileo sudetto, per le cose dedotte in processo e da te confessate come sopra, ti sei reso a questo S.o Off.o veementemente sospetto d'eresia, cioè d'aver tenuto e creduto dottrina falsa e contraria alle Sacre e divine Scritture, ch'il sole sia centro della terra e che non si muova da oriente ad occidente, e che la terra si muova e non sia centro del mondo, e che si possa tener e difendere per probabile un'opinione dopo esser stata dichiarata e diffinita per contraria alla Sacra Scrittura; e conseguentemente sei incorso in tutte le censure e pene dai sacri canoni e altre costituzioni generali e particolari contro simili delinquenti imposte e promulgate. **Dalle quali siamo contenti sii assoluto, pur che prima, con cuor sincero e fede non finta, avanti di noi abiuri, maledichi e detesti li sudetti errori e eresie, e qualunque altro errore e eresia contraria alla Cattolica e Apostolica Chiesa, nel modo e forma da noi ti sarà data. »**



L'abiura

« Io Galileo, fig.lo del q. Vinc.o Galileo di Fiorenza, dell'età mia d'anni 70, costituito personalmente in giudizio, e inginocchiato avanti di voi Emin.mi e Rev.mi Cardinali, in tutta la Republica Cristiana contro l'eretica pravità generali Inquisitori; avendo 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 e insegna la S.a Cattolica e Apostolica Chiesa.

[...] volendo io levar dalla mente delle Eminenze V.re e d'ogni fedel Cristiano questa veemente sospizione, giustamente di me conceputa, **con cuor sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li sudetti errori e eresie**, e generalmente ogni e qualunque altro errore, e eresia 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 aver di me simile sospizione; ma se conoscerò alcun eretico o che sia sospetto d'eresia lo denonzierò a questo S. Offizio, o vero all'Inquisitore o Ordinario del luogo, dove mi trovarò. »



I Discorsi intorno a due nuove scienze (1638)



Luglio **1633**: a Siena, Galileo comincia a mettere insieme i materiali per la stesura dell'opera.

1635: viene pubblicata a Strasburgo una traduzione in latino dei *Discorsi*, per i tipi di Matthias Bernegger.

Maggio **1636**: l'editore Louis Elsevier fa visita a Galileo in Arcetri e acconsente alla pubblicazione del saggio in lingua italiana.

Tale edizione a stampa vedrà la luce soltanto due anni dopo, nel **1638**, a Leida in Olanda.



« Tavola delle materie principali che si trattano nella presente opera »

I.

Scienza nuova prima, intorno alla resistenza de i corpi solidi all'essere spezzati. *Giornata prima.*

II.

Qual potesse esser la causa di tal coerenza. *Giornata seconda.*

III.

Scienza nuova altra, de i movimenti locali, cioè dell'equabile, del naturalmente accelerato. *Giornata terza.*

IV.

Del violento, o vero de i proietti. *Giornata quarta.*

V.

Appendice di alcune proposizioni e dimostrazioni attenenti al centro di gravità de i solidi

INTERLOCUTORI: *Salviati, Sagredo e Simplicio*



La caduta dei gravi

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

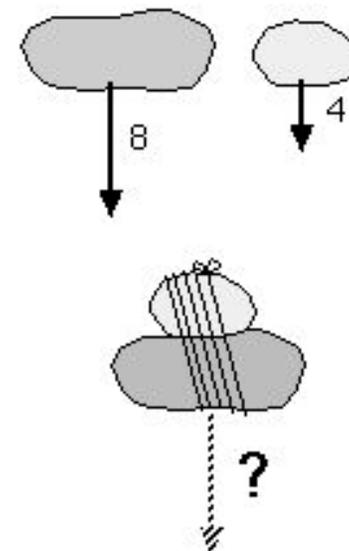
SALVIATI. Ma, **senz'altre esperienze, con breve e concludente dimostrazione possiamo chiaramente provare, non esser vero che un mobile più grave si muova più velocemente d'un altro men grave**, intendendo di mobili dell'istessa materia, ed in somma di quelli de i quali parla Aristotele. Però ditemi,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



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

SIMPLICIO. Parmi che così debba indubitabilmente seguire.

SALVIATI. **Ma se questo è, ed è insieme vero che una pietra grande si muova, per esempio, con otto gradi di velocità, ed una minore con quattro, adunque, congiugnendole amendue insieme, il composto di loro si moverà con velocità minore di otto gradi:** ma le due pietre, congiunte insieme, fanno una pietra maggiore che quella prima, che si moveva con otto gradi di velocità: adunque questa maggiore si muove men velocemente che la 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.





Apollo 15, 1971





Discorsi – terza giornata

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

Se ne rilevano alcune più immediate, come quella, ad esempio, che il moto naturale dei gravi discendenti accelera continuamente; però, secondo quale proporzione tale accelerazione avvenga, non è stato sin qui mostrato: nessuno, che io sappia, infatti, ha dimostrato che un mobile discendente a partire dalla quiete percorre, in tempi eguali, spazi che ritengono tra di loro la medesima proporzione che hanno i numeri impari successivi ab unitate.

È stato osservato che i corpi lanciati, ovverossia i proietti, descrivono una linea curva di un qualche tipo; però, che essa sia una parabola, nessuno l'ha mostrato. Che sia così, lo dimostrerò insieme ad altre non poche cose, né meno degne di essere conosciute, e, ciò che ritengo ancor più importante, si apriranno le porte a una vastissima e importantissima scienza, della quale queste nostre ricerche costituiranno gli elementi; altri ingegni più acuti del mio ne penetreranno poi più ascosi recessi. »



Struttura dei *Discorsi* (giornate III e IV)

« Dividiamo in tre parti la trattazione:
nella prima parte consideriamo ciò che concerne il moto equabile o uniforme;
nella seconda trattiamo del moto naturalmente accelerato;
nella terza, del moto violento, ossia dei proietti. »



Il moto naturalmente accelerato

Salviati. Questo che abbiamo veduto, è quanto il nostro Autore ha scritto del moto equabile.

Passeremo dunque a più sottile e nuova contemplazione intorno al moto naturalmente accelerato, quale è quello che generalmente è esercitato da i mobili gravi descendenti: ed ecco il titolo e l'introduzione.

DEL MOTO NATURALMENTE ACCELERATO



La legge dei numeri dispari e quella dei quadrati: anticipazioni dal *Dialogo*

SALV. Avanti di ogni altra cosa, bisogna considerare come il movimento de i gravi descendent non è uniforme, ma partendosi dalla quiete vanno continuamente accelerandosi; effetto conosciuto ed osservato da tutti, fuor che dal prefato autore moderno, il quale, non parlando di accelerazione, lo fa equabile. Ma questa general cognizione è di niun profitto, quando non si sappia secondo qual proporzione sia fatto questo accrescimento di velocità, conclusione stata sino a i tempi nostri ignota a tutti i filosofi, e primieramente ritrovata e dimostrata dall'Accademico, nostro comun amico: il quale, in alcuni suoi scritti non ancor pubblicati, ma in confidenza mostrati a me e ad alcuni altri amici suoi, dimostra come l'accelerazione del moto retto de i gravi si fa secondo i numeri impari *ab unitate*, cioè che segnati quali e quanti si vogliano tempi eguali, se nel primo tempo, partendosi il mobile dalla quiete, averà passato un tale spazio, come, per esempio, una canna, nel secondo tempo passerà tre canne, nel terzo cinque, nel quarto sette, e così consequentemente secondo i succedenti numeri caffi, che in somma è l'istesso che il dire che gli spazii passati dal mobile, partendosi dalla quiete, hanno tra di loro proporzione duplicata di quella che hanno i tempi ne' quali tali spazii son misurati, o vogliam dire che gli spazii passati son tra di loro come i quadrati de' tempi.

SAGR. Mirabil cosa sento dire. E di questo dite esserne dimostrazion matematica?

SALV. Matematica purissima, e non solamente di questa, ma di molte altre bellissime passioni attenenti a i moti naturali e a i proietti ancora, tutte ritrovate e dimostrate dall'amico nostro: ed io le ho vedute e studiate tutte con mio grandissimo gusto e meraviglia, vedendo suscitata una nuova cognizione intera, intorno ad un soggetto del quale si sono scritti centinaia di volumi; e né pur una sola dell'infinite conclusioni ammirabili che vi son dentro, è stata osservata e intesa da alcuno prima che dal nostro amico



Il contesto della giustificazione ...

« E in primo luogo conviene investigare e spiegare la definizione che corrisponde esattamente al moto accelerato di cui si serve la natura.

Infatti, sebbene sia lecito immaginare arbitrariamente qualche forma di moto e contemplare le proprietà che ne conseguono [...] tuttavia, dal momento che la natura si serve di una certa forma di accelerazione nei gravi discendenti, abbiamo stabilito di studiarne le proprietà, posto che la definizione che daremo del nostro moto accelerato abbia a corrispondere con l'essenza del moto naturalmente accelerato.

Questa coincidenza crediamo di averla raggiunta finalmente, dopo lunghe riflessioni; **soprattutto per il fatto che le proprietà, da noi successivamente dimostrate, sembrano esattamente corrispondere e coincidere con ciò che gli esperimenti naturali presentano ai sensi.** »



... e quello della scoperta

« Infine a studiare il moto naturalmente accelerato siamo stati condotti quasi per mano dall'osservazione della consuetudine e della regola seguite dalla natura medesima in tutte le altre sue opere, nella cui attuazione suole far uso dei mezzi più immediati, più semplici, più facili.

Ritengo infatti che non vi sia nessuno, il quale creda che si possa praticare il nuoto o il volo in una maniera più semplice e più facile di quella usata, per istinto naturale, dai pesci e dagli uccelli.

Quando, dunque, osservo che una pietra, che discende dall'alto a partire dalla quiete, acquista via via nuovi incrementi di velocità, perché non dovrei credere che tali aumenti avvengano secondo la più semplice e più ovvia proporzione?

Ora, se consideriamo attentamente la cosa, non troveremo nessun aumento o incremento più semplice di quello che aumenta sempre nel medesimo modo. »



La definizione

« [...] come infatti la equabilità e uniformità del moto si definisce e si concepisce sulla base della eguaglianza dei tempi e degli spazi [...] così, mediante una medesima suddivisione uniforme del tempo, possiamo concepire che gli **incrementi di velocità** avvengano con [altrettanta] semplicità; [lo possiamo] in quanto stabiliamo in astratto che risulti uniformemente e, nel medesimo modo, continuamente accelerato, quel moto che in tempi eguali, comunque presi, acquista eguali aumenti di velocità.

Possiamo quindi ammettere la seguente definizione del moto di cui tratteremo:

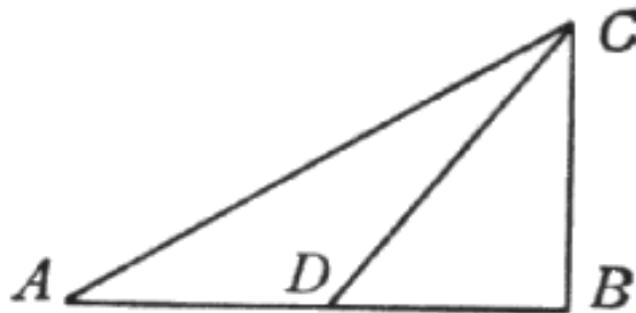
Moto equabilmente, ossia uniformemente accelerato, dico quello che, a partire dalla quiete, in tempi eguali acquista eguali momenti di velocità. »



Il principio

SALVIATI. Fermata cotal definizione, un solo principio domanda e suppose per vero l'Autore, cioè:

Assumo che i gradi di velocità, acquistati da un medesimo mobile su piani diversamente inclinati, siano eguali allorché sono eguali le elevazioni di quei piani medesimi.





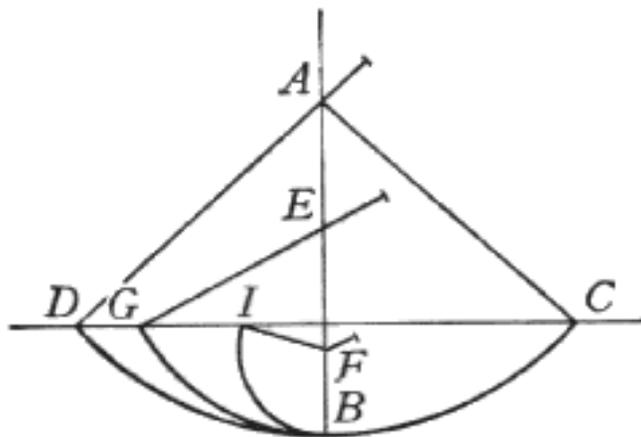
La “dimostrazione”

SAGREDO. Veramente **mi par che tal supposto abbia tanto del probabile, che meriti di esser senza controversia concesso**, intendendo sempre che si rimuovano tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni, e che i piani siano ben solidi e tersi ed il mobile di figura perfettissimamente rotonda, sì che ed il piano ed il mobile non abbiano scabrosità. Rimossi tutti i contrasti ed impedimenti, il lume naturale mi detta senza difficoltà, che una palla grave e perfettamente rotonda, scendendo per le linee *CA, CD, CB*, giugnerebbe ne i termini *A, D, B* con impeti eguali.

SALVIATI. Voi molto probabilmente discorrete; ma, oltre al verisimile, **voglio con una esperienza accrescer tanto la probabilità, che poco gli manchi all'agguagliarsi ad una ben necessaria dimostrazione.**



I fenomeni del pendolo



Questa esperienza non lascia luogo di dubitare della verità del supposto: imperò che, essendo li due archi CB , DB eguali e similmente posti, l'acquisto di momento fatto per la scesa nell'arco CB è il medesimo che il fatto per la scesa dell'arco DB ; ma il momento acquistato in B per l'arco CB è potente a risospingere in su il medesimo mobile per l'arco BD ; adunque anco il momento acquistato nella scesa DB è eguale a quello che sospigne l'istesso mobile per il medesimo arco da B in D ; sì che, universalmente, ogni momento acquistato per la scesa d'un arco è eguale a quello che può far risalire l'istesso mobile per il medesimo arco: ma i momenti tutti che fanno risalire per tutti gli archi BD , BG , BI sono eguali, poichè son fatti dall'istesso medesimo momento acquistato per la scesa CB , come mostra l'esperienza; adunque tutti i momenti che si acquistano per le scese ne gli archi DB , GB , IB sono eguali.



Le critiche dei contemporanei: Cartesio

« Egli suppone inoltre che i gradi di velocità di uno stesso corpo su piani diversi siano uguali quando le altezze di questi piani sono uguali, cosa che non dimostra e che non è del tutto vera; e poiché tutto ciò che segue non dipende che da queste due supposizioni, si può asserire che egli ha costruito totalmente in aria. »

Lettera di Cartesio a Mersenne dell'11 ottobre 1638





Le critiche dei contemporanei: Torricelli

« Sul punto di trattare del Moto naturalmente accelerato Galileo suppone un principio, che anch'egli non ritiene del tutto evidente, poiché si sforza di provarlo con l'esperimento poco esatto del pendolo.

[...]

So che Galileo negli ultimi anni della sua vita cercò di dimostrare quella supposizione, ma poiché la sua argomentazione non è stata edita con il libro sul Moto, ritenemmo di proporre al nostro libretto queste poche righe, affinché appaia che la supposizione di Galileo si può dimostrare. »

Evangelista Torricelli, *Opere* (1919)





Obiezioni alla definizione

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



Una definizione alternativa (scorretta)

Sagredo. Per quanto per ora mi si rappresenta all`intelletto, mi pare che con chiarezza forse maggiore si fusse potuto definire, senza variare il concetto:
Moto uniformemente accelerato esser quello, nel quale la velocità andasse crescendo secondo che cresce lo spazio che si va passando;

sì che, per esempio, il grado di velocità acquistato dal mobile nella scesa di quattro braccia fusse doppio di quello ch` egli ebbe, sceso che e` fu lo spazio di due, e questo doppio del conseguito nello spazio del primo braccio. Perché non mi par che sia da dubitare, che quel grave che viene dall`altezza di sei braccia, non abbia e perquota con impeto doppio di quello che ebbe, sceso che fu tre braccia, e triplo di quello che ebbe alle due, e sescuplo dell`auto nello spazio di uno.



... a cui credette Galileo

Galileo a Paolo Sarpi in Venezia

Padova, 16 ottobre 1604

« Ripensando circa le cose del moto, nelle quali, per dimostrare li accidenti da me osservati, mi mancava principio totalmente indubitabile da poter porlo per assioma, mi son ridotto ad una proposizione la quale ha molto del naturale et dell'evidente;

[...]

Et il principio è questo: che il mobile naturale vadia crescendo di velocità con quella proportione che si discosta dal principio del suo moto; come, v. g., cadendo il grave dal termine a per la linea $abcd$, suppongo che il grado di velocità che ha in c al grado di velocità che hebbe in b esser come la distanza ca alla distanza ba , et così conseguentemente in d haver grado di velocità maggiore che in c secondo che la distanza da è maggiore della ca . »





Errori su errori ...

Salviati. [...] Quando le velocità hanno la medesima proporzione che gli spazii passati o da passarsi, tali spazii vengon passati in tempi eguali; se dunque le velocità con le quali il cadente passò lo spazio di quattro braccia, furon doppie delle velocità con le quali passò le due prime braccia (sì come lo spazio è doppio dello spazio), adunque i tempi di tali passaggi sono eguali: ma passare il medesimo mobile le quattro braccia e le due nell'istesso tempo, non può aver luogo fuor che nel moto instantaneo: ma noi veggiamo che il grave cadente fa suo moto in tempo, ed in minore passa le due braccia che le quattro; adunque è falso che la velocità sua cresca come lo spazio.

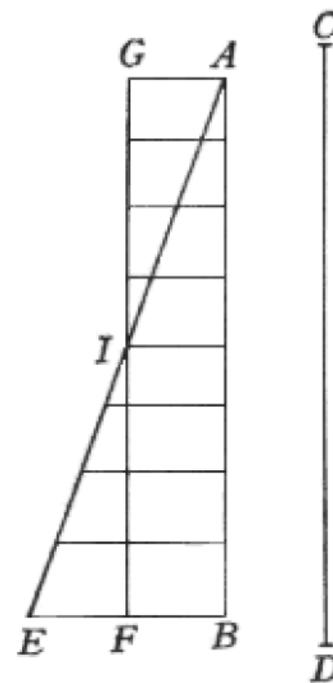
L'altra proposizione si dimostra falsa con la medesima chiarezza. Imperò che, essendo quello che perquote il medesimo, non può determinarsi la differenza e momento delle percosse se non dalla differenza della velocità: quando dunque il percuziente, venendo da doppia altezza, facesse percossa di doppio momento, bisognerebbe che percotesse con doppia velocità: ma la doppia velocità passa il doppio spazio nell'istesso tempo, e noi veggiamo il tempo della scesa dalla maggior altezza esser più lungo.



Il teorema della media

TEOREMA 1. PROPOSIZIONE 1

Il tempo in cui uno spazio dato è percorso da un mobile con moto uniformemente accelerato a partire dalla quiete, è eguale al tempo in cui quel medesimo spazio sarebbe percorso dal medesimo mobile mosso di moto equabile, il cui grado di velocità sia sudduplo [la metà] del grado di velocità ultimo e massimo [raggiunto dal mobile] nel precedente moto uniformemente accelerato.





Il teorema dei quadrati

TEOREMA 2. PROPOSIZIONE 2

Se un mobile scende, a partire dalla quiete, con moto uniformemente accelerato, gli spazi percorsi da esso in tempi qualsiasi stanno tra di loro in duplicata proporzione dei tempi [in un rapporto pari al rapporto dei tempi moltiplicato per se stesso], cioè stanno tra di loro come i quadrati dei tempi.



La conferma sperimentale

SIMPLICIO. Io veramente ho preso più gusto in questo semplice e chiaro discorso del Sig. Sagredo, che nella per me più oscura dimostrazione dell'Autore; sì che io resto assai ben capace che il negozio deva succeder così, posta e ricevuta la definizione del moto uniformemente accelerato.

Ma se tale sia poi l'accelerazione della quale si serve la natura nel moto de i suoi gravi descendentì, io per ancora ne resto dubbioso; e però, per intelligenza mia e di altri simili a me, parmi che sarebbe stato opportuno in questo luogo arrecar qualche esperienza di quelle che si è detto esservene molte, che in diversi casi s'accordano con le conclusioni dimostrate.

SALVIATI. Voi, da vero scienziato, fate una ben ragionevol domanda; e così si costuma e conviene nelle scienze le quali alle conclusioni naturali applicano le dimostrazioni matematiche, come si vede ne i prospettivi, negli astronomi, ne i meccanici, ne i musici ed altri, li quali con sensate esperienze confermano i principii loro, che sono i fondamenti di tutta la seguente struttura: e però non voglio che ci paia superfluo se con troppa lunghezza aremo discorso sopra questo primo e massimo fondamento, sopra 'l quale s'appoggia l'immensa machina d'infinite conclusioni.



L'esperimento del piano inclinato

SALVIATI. [...] Circa dunque all'esperienze, non ha tralasciato l'Autor di farne; e per assicurarsi che l'accelerazione de i gravi naturalmente descendenti segua nella proporzione sopradetta, molte volte mi son ritrovato io a farne la prova nel seguente modo, in sua compagnia.

In un regolo, o vogliàn dir corrente, di legno, lungo circa 12 braccia, e largo per un verso mezo braccio e per l'altro 3 dita, si era in questa minor larghezza incavato un canaletto, poco più largo d'un dito; tiratolo drittissimo, e, per averlo ben pulito e liscio, incollatovi dentro una carta pecora zannata e lustrata al possibile, si faceva in esso scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotondata e pulita;

costituito che si era il detto regolo pendente, elevando sopra il piano orizzontale una delle sue estremità un braccio o due ad arbitrio, **si lasciava (come dico) scendere per il detto canale la palla, notando, nel modo che appresso dirò, il tempo che consumava nello scorrerlo tutto, replicando il medesimo atto molte volte per assicurarsi bene della quantità del tempo, nel quale non si trovava mai differenza né anco della decima parte d'una battuta di polso.**

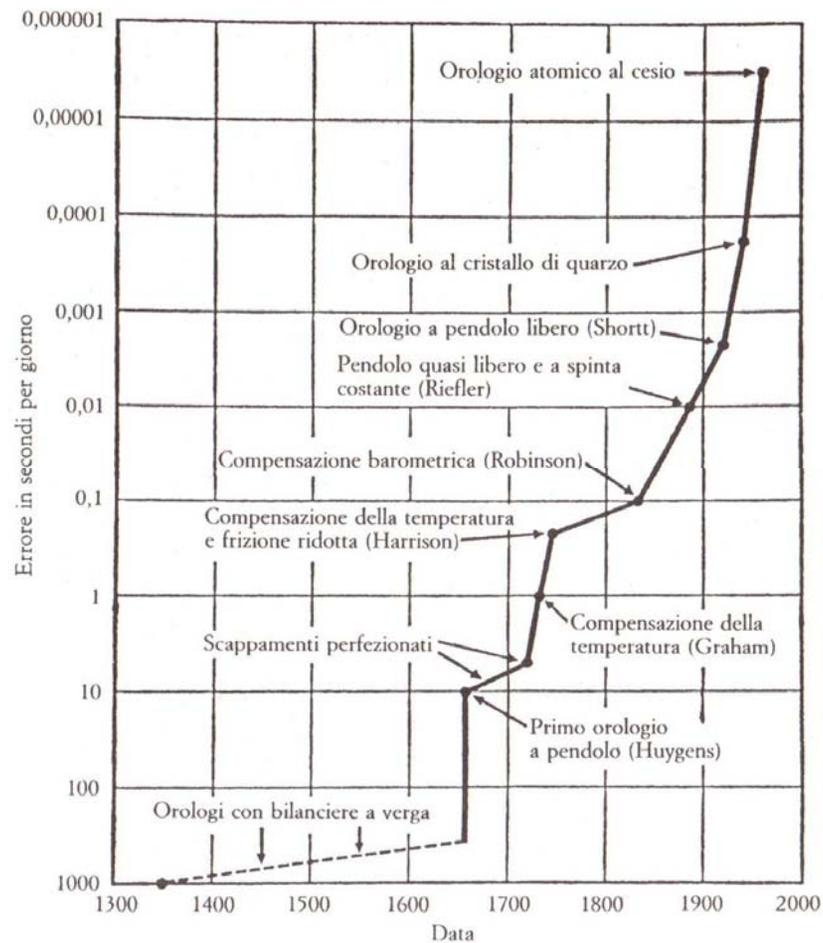


La conferma

Fatta e stabilita precisamente tale operazione, **facemmo scender la medesima palla solamente per la quarta parte della lunghezza di esso canale; e misurato il tempo della sua scesa, si trovava sempre puntualissimamente esser la metà dell'altro:** e facendo poi l'esperienze di altre parti, esaminando ora il tempo di tutta la lunghezza col tempo della metà, o con quello delli duo terzi o de i $3/4$, o in conclusione con qualunque altra divisione, per esperienze ben cento volte replicate sempre s'incontrava, gli spazii passati esser tra di loro come i quadrati e i tempi, e questo in tutte le inclinazioni del piano, cioè del canale nel quale si faceva scender la palla; [...]



Come misurare il tempo?



Tratto da: Carlo M. Cipolla, *Le macchine del tempo* (1981)



La secchia d'acqua

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





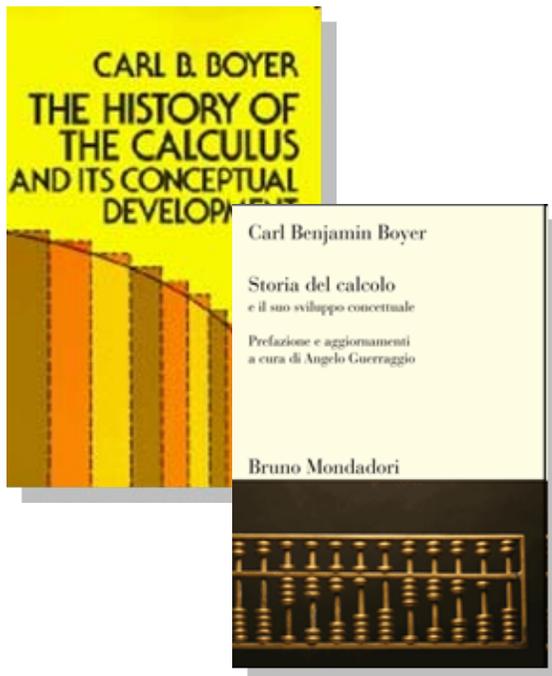
L'abbandono delle cause e la verifica sperimentale

SALVIATI. Non mi par tempo opportuno d'entrare al presente nell'investigazione della causa dell'accelerazione del moto naturale, intorno alla quale da varii filosofi varie sentenze sono state prodotte,

Per ora basta al nostro Autore che noi intendiamo che egli ci vuole investigare e dimostrare alcune passioni di un moto accelerato (qualunque si sia la causa della sua accelerazione) talmente, che i momenti della sua velocità vadano accrescendosi, dopo la sua partita dalla quiete, con quella semplicissima proporzione con la quale cresce la continuazion del tempo, che è quanto dire che in tempi eguali si facciano eguali additamenti di velocità; **e se s' incontrerà che gli accidenti che poi saranno dimostrati si verificchino nel moto de i gravi naturalmente descendenti ed accelerati, potremo reputare che l'assunta definizione comprenda cotal moto de i gravi, e che vero sia che l'accelerazione loro vadia crescendo secondo che cresce il tempo e la durazione del moto.**



« È molto diffusa la convinzione che la scienza della dinamica [...] sia stata quasi interamente il prodotto del genio di Galileo, che “dovette creare [...] per noi” la “totalmente nuova nozione [...] di accelerazione”.



Questa ipotesi è, però, decisamente inaccettabile per chiunque si prenda la briga di condurre un esame, anche superficiale, delle dottrine del XIV secolo relative alla variabilità delle forme. »

Carl B. Boyer

The History of the Calculus and Its Conceptual Development (1949)



Anticipazioni della geometria analitica: Nicola Oresme (1323–1382)

« L'opera di Oresme segna [...] un notevole progresso nell'analisi matematica, grazie al fatto che associa lo studio della variazione con la rappresentazione mediante coordinate. »

Carl B. Boyer

The History of the Calculus and Its Conceptual Development (1949)

linea dell'intensione,
o della velocità



linea dell'estensione,
del soggetto o del tempo

« L'idea fondamentale del sistema è semplice. Certe figure geometriche [...] possono essere usate per rappresentare la quantità di una qualità.

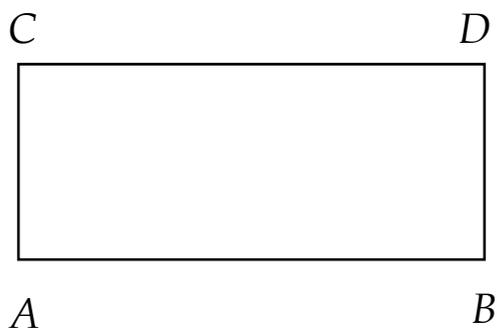
L'estensione della qualità in un soggetto dev'essere rappresentata con una linea orizzontale, mentre le intensità qualitative in diversi punti del soggetto devono essere rappresentate da linee perpendicolari all'estensione o linea del soggetto. »

Marshall Clagett

La scienza della meccanica nel Medioevo (1959)



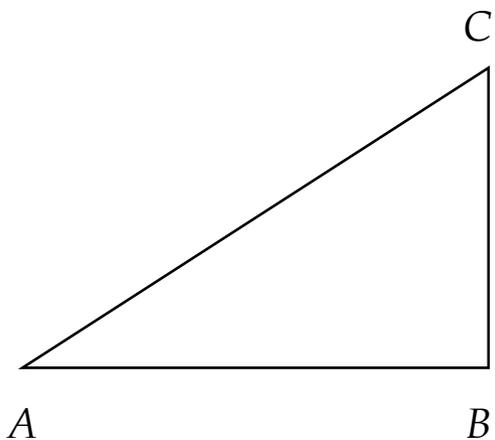
Anticipazioni della geometria analitica



« [...] la linea superiore della figura per mezzo della quale si rappresenta la qualità sia detta linea dell'intensione o linea della sommità [...]

Se dunque una tale linea della sommità [...] sarà equidistante dalla base [...] la qualità raffigurabile mediante tale figura sarà **semplicemente uniforme**.

Se invece non sarà equidistante dalla base e sarà retta, la qualità sarà **uniformemente difforme**. »



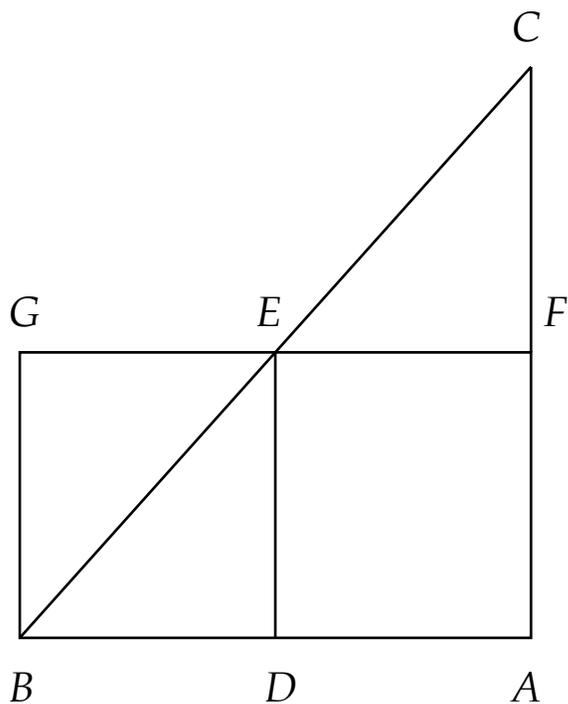
N. Oresme, *De configurationibus qualitatum* (ca 1350)
(tratto da M. Clagett, 1959)



Nicola Oresme (1323–1382)

« Ogni qualità uniformemente difforme è tanto grande quanta sarebbe la qualità dello stesso soggetto o di un soggetto uguale uniforme secondo il grado del punto medio dello stesso soggetto. »

Nicola Oresme





Ulteriori precursori medievali: Il Merton College di Oxford

« Non siamo in grado di datare con precisione la prima comparsa del teorema dell'accelerazione al Merton College, ma poiché esso appare similmente nelle opere di Heytersbury, di Swinshead e di Giovanni Dumbleton, tutti attivi al Merton tra il 1330 e il 1350, non saremmo probabilmente molto lontani dal vero datando la scoperta attorno all'inizio del decennio 1330-1340. »

Marshall Clagett

La scienza della meccanica nel Medioevo (1959)





Isaac Newton

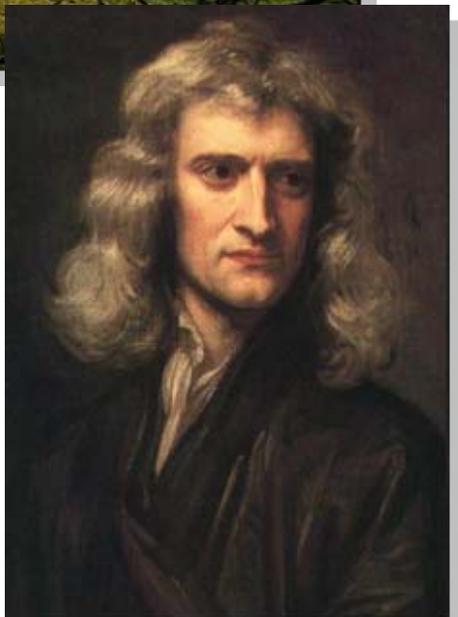
(1642-1727)

« Le scoperte del cavalier Newton, che gli hanno garantito una fama così universale, riguardano il sistema del mondo, la luce, l'infinito in geometria, e infine la cronologia, con la quale si è divertito tanto per rilassarsi. »

Voltaire, *Lettere filosofiche* (1734)



L'annus mirabilis



« All'inizio dell'anno 1665 trovai il Metodo di approssimazione delle serie e la regola per ridurre un qualunque esponente di un binomio qualsiasi a tali serie. Lo stesso anno trovai il metodo delle tangenti [...] e in novembre avevo il metodo diretto delle flussioni e l'anno successivo in gennaio la teoria dei colori e il maggio seguente possedevo il metodo inverso delle flussioni.

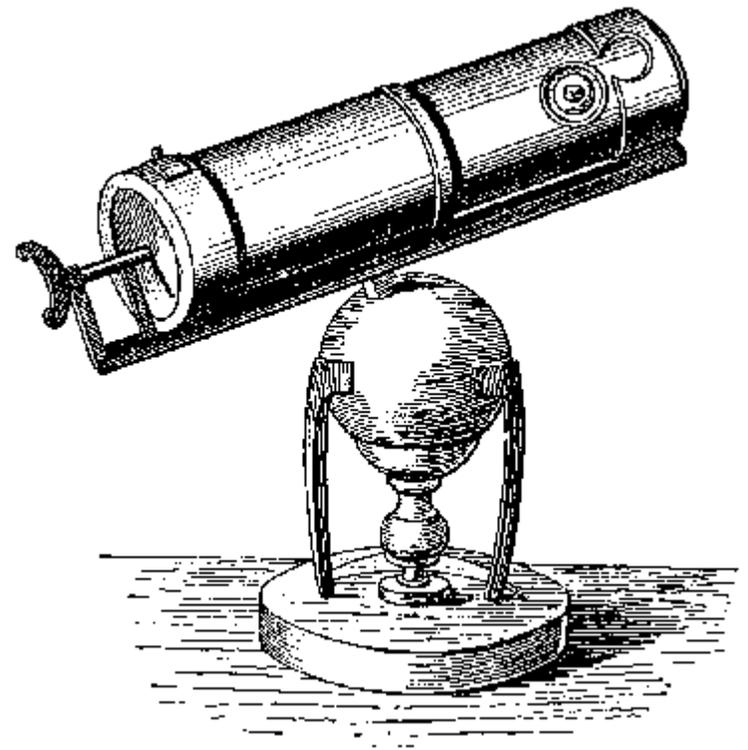
E nello stesso anno cominciai a pensare alla gravità che si estende fino all'orbita della Luna [...].

Tutto ciò avvenne nei due anni della peste del 1665 e 1666, poiché in quei giorni ero nel fiore dell'età creativa e attendevo alla Matematica e alla Filosofia più di quanto abbia mai fatto in seguito. »

Isaac Newton



Il telescopio a riflessione: 1668





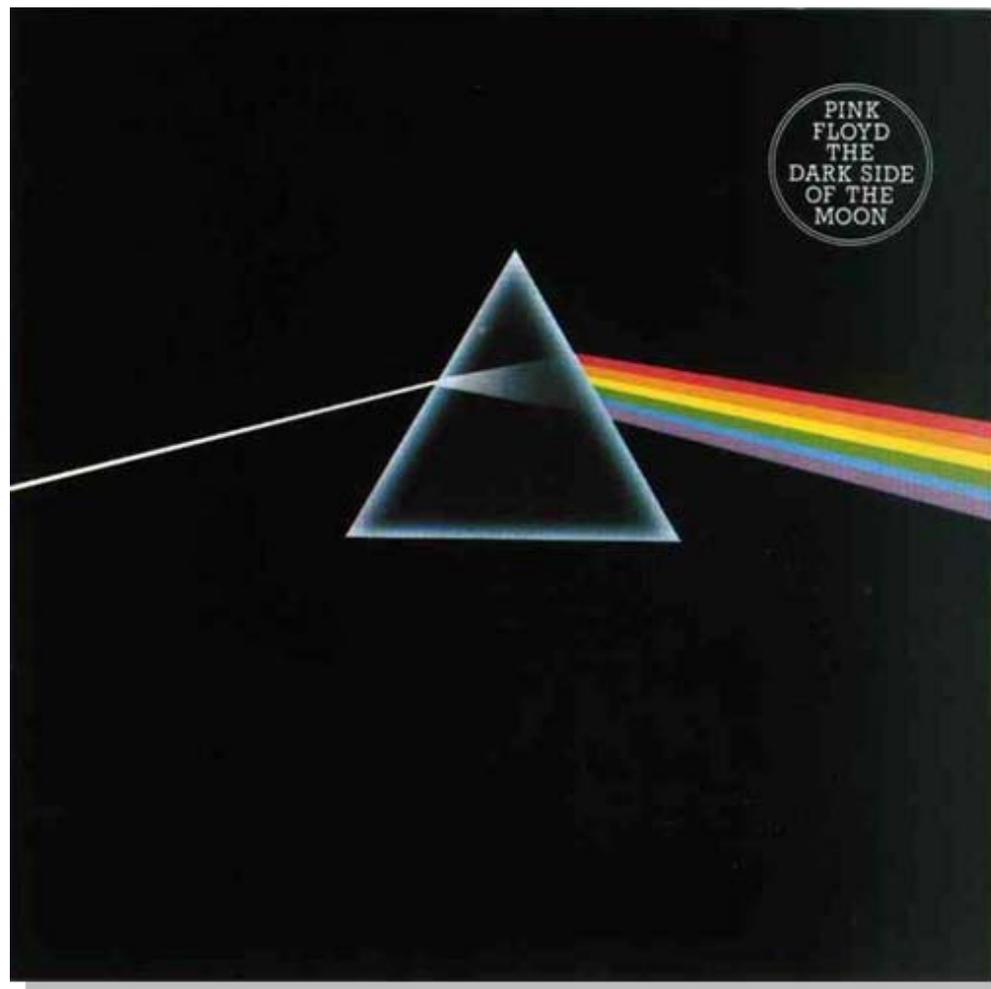
Una scoperta straordinaria

Desidero che nella vostra prossima lettera mi vogliate informare per quanto tempo la Royal Society continua le sue riunioni settimanali, giacché se esse proseguono per qualche tempo intendo proporre, affinché sia considerato ed esaminato, un resoconto di una *scoperta filosofica* che mi indusse alla costruzione del detto telescopio e che non dubito risulterà molto più gradita della comunicazione di quello strumento, essendo a mio giudizio la più *straordinaria*, se non la più considerevole, rivelazione che sia stata compiuta finora nelle operazioni della natura.⁹

Da una lettera di Newton a Henry Oldenburg (segretario della *Royal Society*), 18 gennaio 1672



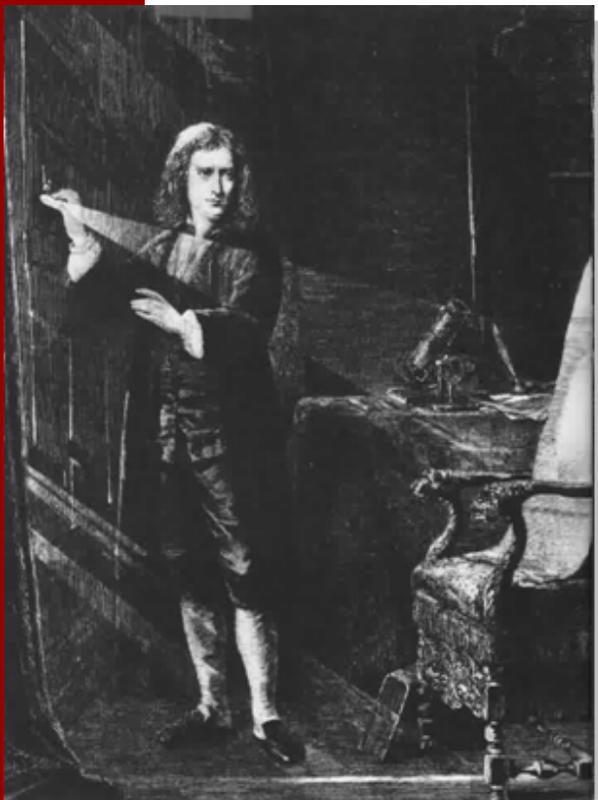
Il prisma di Newton





L'ipotesi sui colori

Nell'agosto 1665 Sir I.[saac], che allora non aveva ancora ventiquattro anni, comperò alla fiera di Stourbridge un prisma per verificare alcuni esperimenti relativi al libro dei colori di Descartes; quando giunse a casa, praticò un foro nella sua imposta, oscurò la stanza e collocò il suo prisma tra quel foro e la parete; e scoprì che invece di un cerchio la luce aveva questa forma , con i lati retti e le estremità circolari, etc. Il che lo convinse immediatamente che Descartes aveva torto e formulò così la propria ipotesi sui colori, benché non potesse dimostrarla per mancanza di un altro prisma, per il quale aspettò fino alla successiva fiera di Stourbridge e a quel punto dimostrò ciò che prima aveva scoperto.¹⁰⁹



John Conduitt (nipote acquisito di Newton).

Da: R. S. Westfall, *Newton*, (trad. it.) 1989.



La Royal Society

Trinity College, Cambridge, 6 febbraio 1672

Signore,

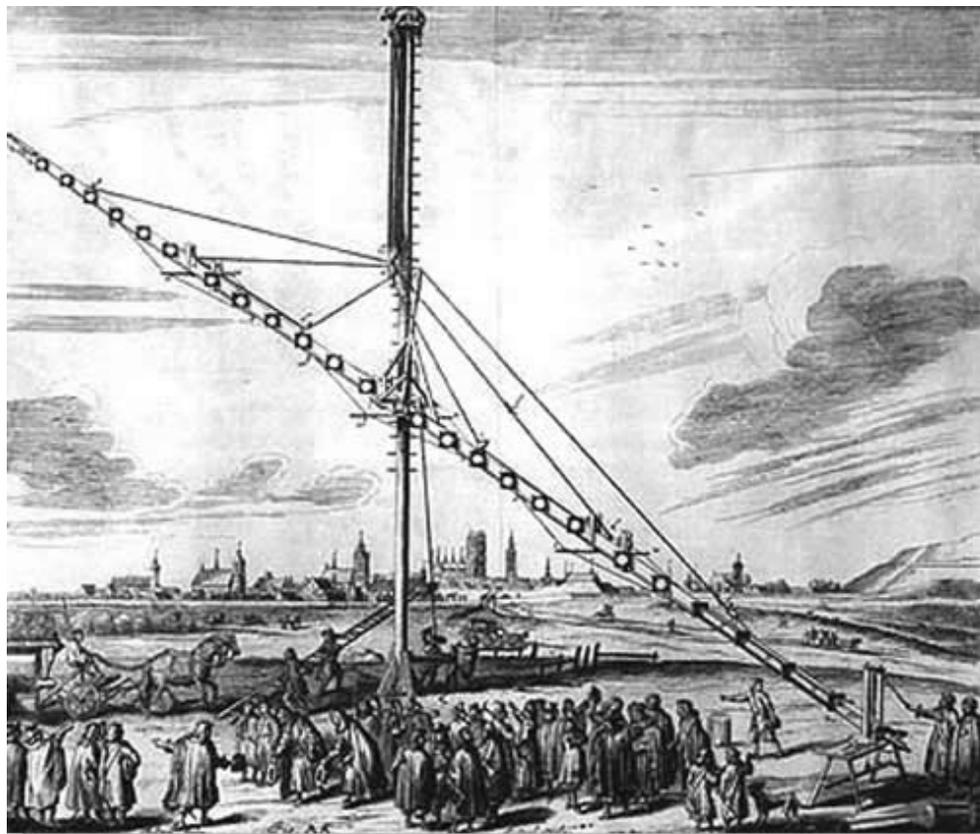
[...] vi informerò senza altre cerimonie che all'inizio dell'anno 1666 (tempo durante il quale mi applicavo alla molatura di lenti in forme diverse dalla sferica) mi procurai un prisma triangolare di vetro per fare con esso esperimenti sui famosi fenomeni dei colori. [...]

Capito questo, misi da parte il mio predetto lavoro di molatura delle lenti. Rilevavo, infatti che il perfezionamento dei telescopi era stato fin qui limitato non tanto dalla mancanza di lenti correttamente formate (la qual cosa tutti hanno fin qui supposto) secondo le prescrizioni degli autori di ottica, quanto dal fatto che la luce stessa è una *mescolanza eterogenea di raggi diversamente rifrangibili*. Sicché, anche se una lente fosse così esattamente formata da raccogliere qualsiasi genere di raggi in un solo punto, essa non potrebbe raccogliere nel medesimo punto anche quelli che cadendo con la medesima incidenza sul medesimo mezzo sono atti a subire una differente rifrazione.

Isaac Newton, *Nuova teoria sulla luce e sui colori* [scritta in forma di lettera a Henry Oldenburg, segretario della Royal Society di Londra] (1672),



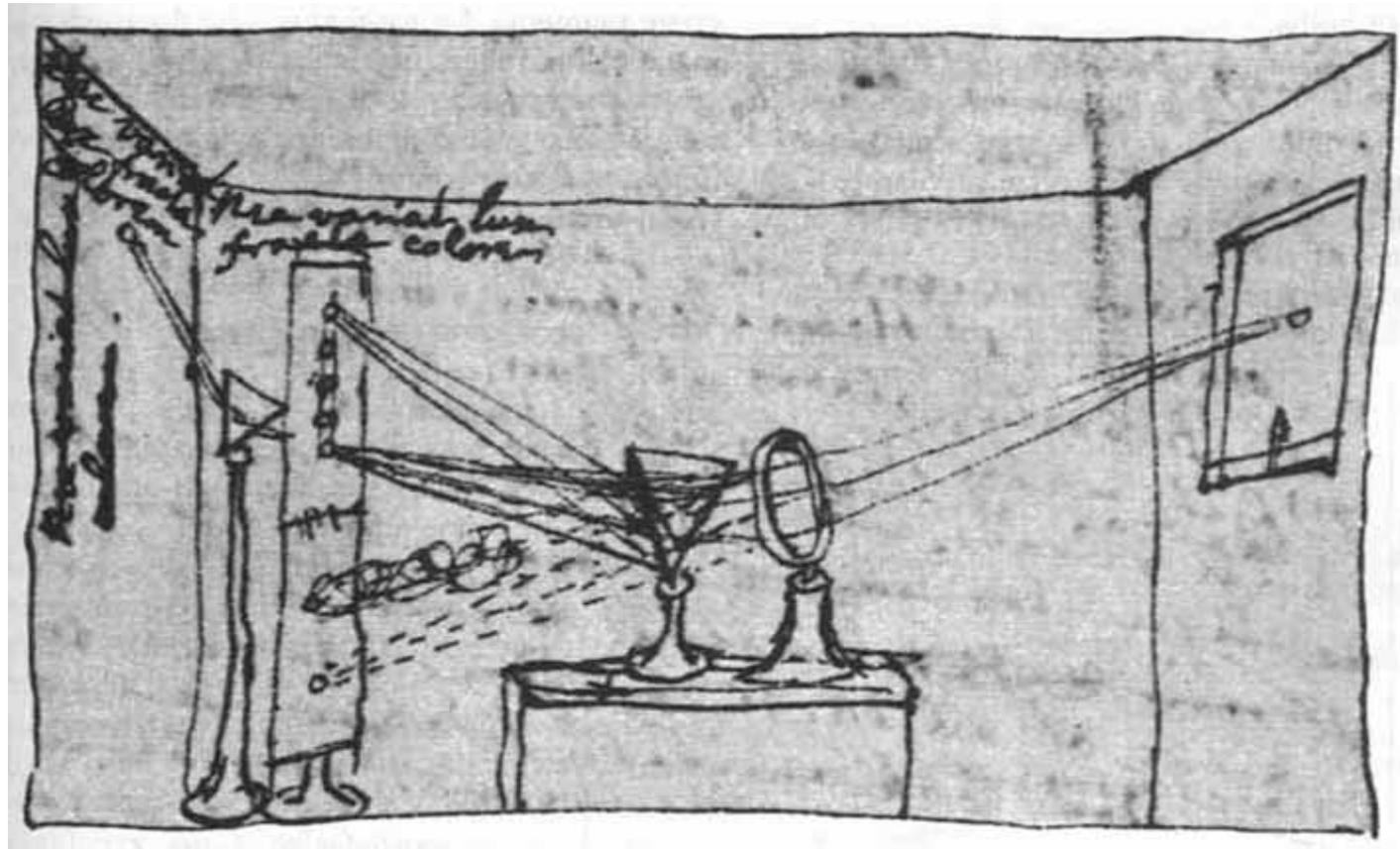
Prima di Newton...



Telescopio costruito da Hevelius alla metà del XVII secolo



L'experimentum crucis





Il premio da 40 scellini

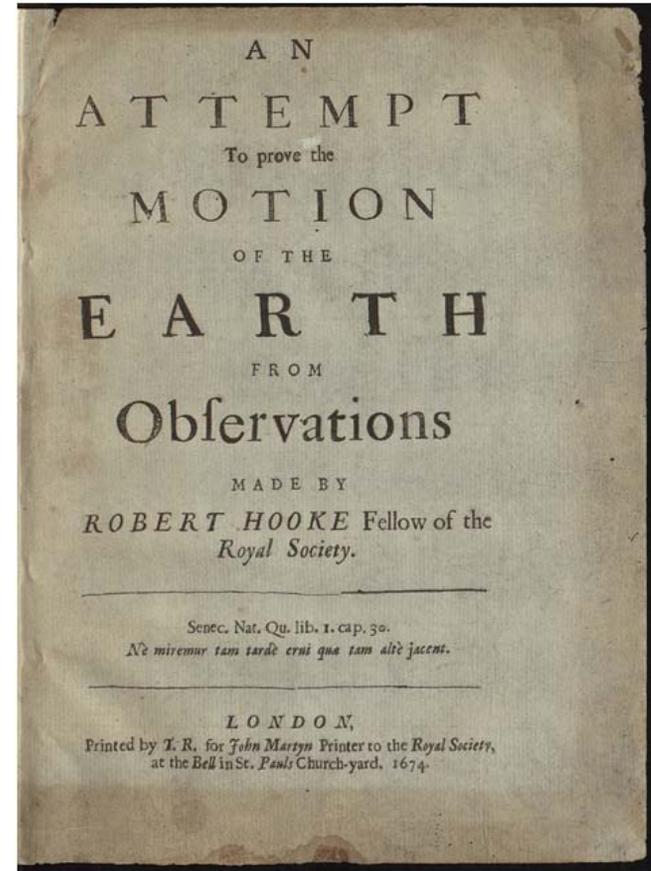


Edmund Halley, su un incontro avvenuto nel gennaio del 1684.

Essendomi trovato con Sir Christopher Wren e con il signor Hooke, ed essendo il discorso caduto su tale questione, il signor Hooke affermò che, sulla base di quel principio, si sarebbero potute dimostrare tutte le leggi dei moti celesti, come egli stesso aveva già fatto. Io, per quanto mi riguardava, ammisi il fallimento dei miei tentativi e Sir Christopher, per incoraggiare la ricerca, disse che avrebbe concesso al signor Hooke e a me due mesi di tempo per dargli una dimostrazione convincente. Oltre all'onore che in tal modo ci veniva fatto, avremmo avuto da lui, come omaggio, un libro del valore di 40 scellini. Il signor Hooke allora disse che egli già possedeva la dimostrazione ma che voleva tenerla nascosta per un certo periodo di tempo, così che altri, tentando di ricavarla e fallendo nelle loro ricerche, potessero pienamente riconoscerne il valore non appena egli l'avesse resa pubblica. Ricordo tuttavia che Sir Christopher era scettico che Hooke potesse fornire la dimostrazione; e, sebbene il signor Hooke avesse allora promesso di mostrargli la dimostrazione, non mi pare che in quel caso particolare egli abbia tenuto fede alle sue parole.



Anticipazioni di Hooke (1674)



Robert Hooke. *An attempt to prove the motion of the Earth*.
London: printed for John Martin, 1674.
Title page.



Le tre ipotesi di Hooke

I shall explain a System of the World differing in many particulars from any yet known [...] This depends upon three Suppositions.

First, That all Coelestial Bodies whatsoever, have an attraction or gravitating power towards their own Centers, whereby they attract not only their own parts, and keep them from flying from them, as we may observe the Earth to do, but that they do also attract all the other Coelestial Bodies that are within the sphere of their activity;

The second supposition is this, That all bodies whatsoever that are put into a direct and simple motion, will so continue to move forward in a streight line, till they are by some other effectual powers deflected and bent into a Motion, describing a Circle, Ellipsis, or some other more compounded Cur ve Line.

The third supposition is, That these attractive powers are so much the more powerful in operating, by how much the nearer the body wrought upon is to their own Centers. Now what these several degrees are I have not yet experimentally verified; but it is a notion, which if fully prosecuted as it ought to be, will mightily assist the Astronomer to reduce all the Coelestial Motions to a certain rule, which I doubt will never be done true without it.



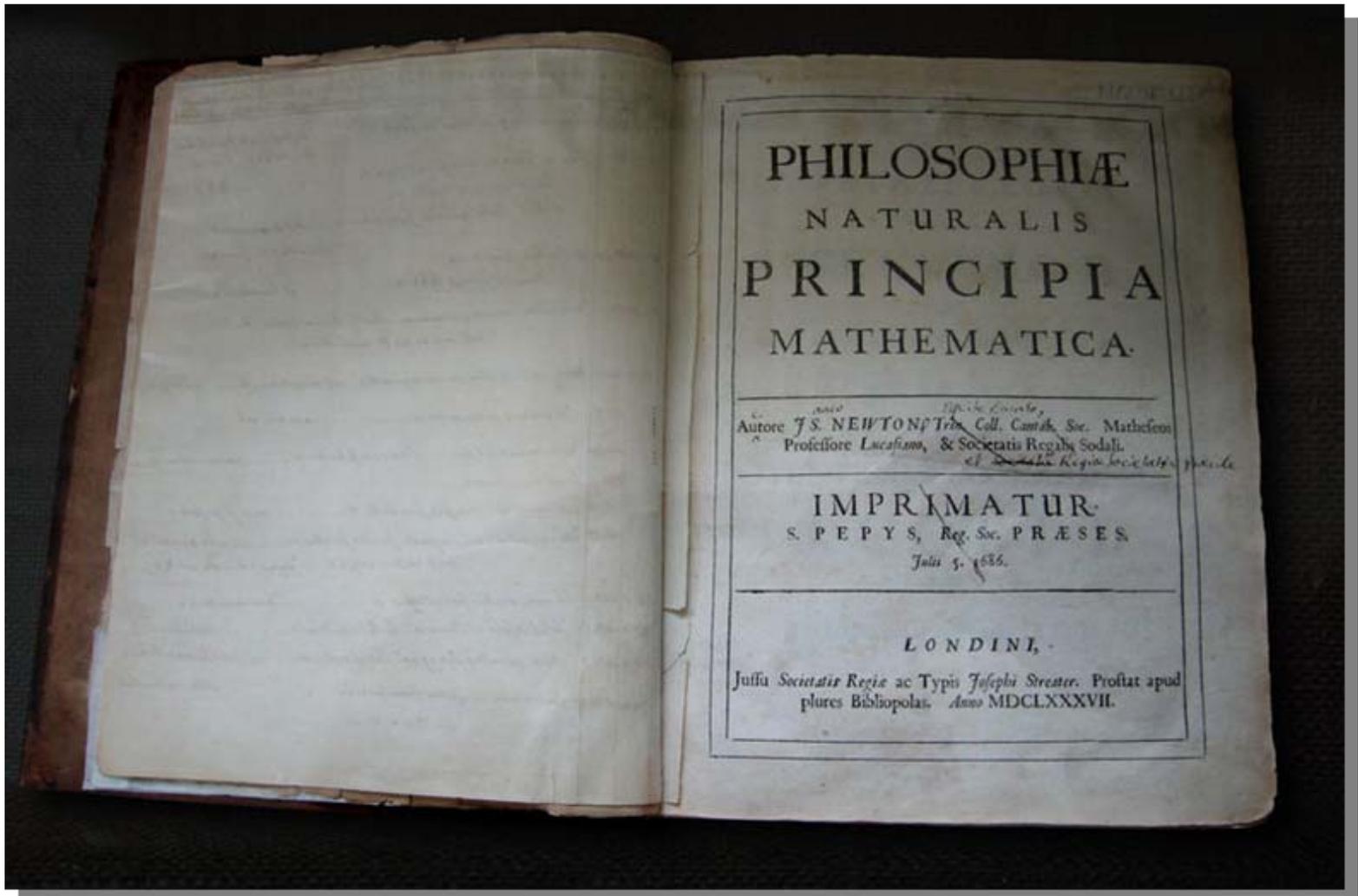
Halley visita Newton

Nel 1684, il dottor Halley lo venne a trovare a Cambridge e, dopo essere stati un po' insieme, gli chiese quale pensasse che fosse la curva che i pianeti descriverebbero supponendo che la forza di attrazione verso il Sole varii come il reciproco del quadrato della loro distanza. Sir Isaac rispose immediatamente che sarebbero ellissi, e il dottore [Halley] pieno di gioia e sorpresa gli chiese come facesse a saperlo. «Perché» gli rispose «l'ho calcolato». Per cui il dottor Halley gli chiese subito i suoi calcoli, ma Sir Isaac guardando tra i suoi fogli non poté trovarlo e promise di cercarlo ancora e di mandarglielo.

*Cit. in Westfall, *Never at Rest. A biography of Isaac Newton* (1980)*



I Principia: 1687





Gli assiomi o "leggi" del moto

AXIOMATA, SIVE

AXIOMATA,
SIVE
LEGES MOTUS.

LEX I.

(¹) *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus à viribus impressis cogitur statum illum mutare.*

LEGGI I

Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, salvo che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse.

PHILOSOPHIE NAT. PRINCIPIA MATHEM. 21

LEX II.

LEGES
MOTUS

(¹) *Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, & fieri secundum lineam rectam quâ vis illa imprimitur.*

LEGGI II

Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, ed avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa

PRINCIPIA MATHEMATICA. 23

(^a) LEX III.

AXIOMATA, SIVE
LEGES
MOTUS.

Actiõni contrariam semper & æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales & in partes contrarias dirigi.

LEGGI III

Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria: ossia, le azioni di due corpi sono sempre uguali fra loro e dirette verso parti opposte.

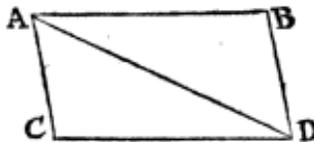


La regola del parallelogramma

COROLLARIUM I.

Corpus viribus conjunctis diagonalem parallelogrammi eodem tempore describere, quo latera separatis.

Si corpus dato tempore, vi solâ M in loco A impressâ, ferretur uniformi cum motu ab A ad B ; & vi solâ N in eodem loco impressâ, ferretur ab A ad C : compleatur parallelogrammum $ABDC$, & vi utraq̃ue feretur corpus illud eodem tempore in diagonali ab A ad D . Nam ^(b) quoniam vis N agit secundum lineam AC ipsi BD parallelam, hæc vis per Legem II . nihil mutabit velocitatem accedendi ad lineam illam BD à vi alterâ genitam. Accedet igitur corpus eodem tempore ad lineam BD , sive vis N imprimatur, sive non; ^(c) atque ideo in fine illius temporis reperietur alicubi in lineâ illâ BD . Eodem



argu-

COROLLARIO I

Un corpo spinto da forze congiunte, descriverà la diagonale di un parallelogramma nello stesso tempo nel quale descriverebbe separatamente i lati.



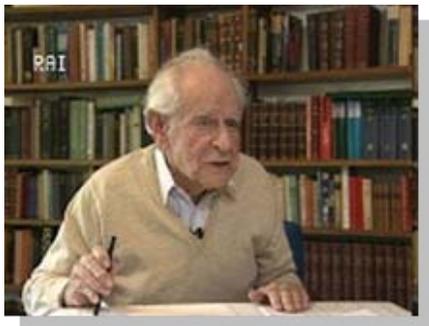
La conferma delle leggi di Keplero

« È particolarmente significativo il modo in cui Newton arrivò a stabilire, o a confermare, la seconda legge di Keplero, quella delle aree, stando la quale i pianeti spazzano aree uguali in tempi uguali. Si trattò davvero di una dimostrazione meravigliosamente semplice e meravigliosamente potente.

[...]

Egli si basò, oltre che sul principio d'inerzia, su alcuni semplici metodi euclidei [...]

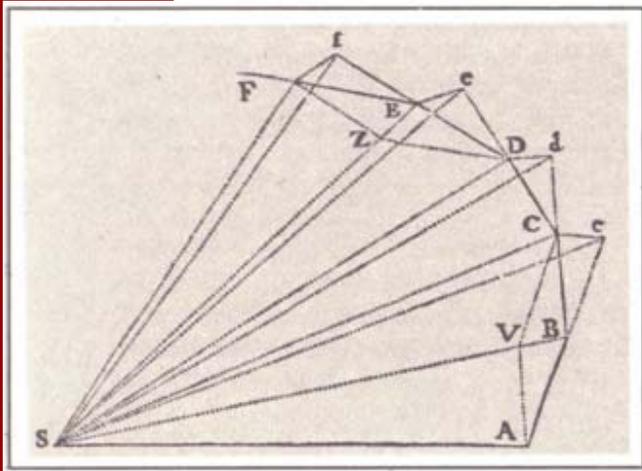
Usando questo metodo e gli assunti del principio d'inerzia, Newton trovò che il movimento dei pianeti è completamente spiegato supponendo l'esistenza di una legge di attrazione verso un unico centro. »



Karl Popper
Intervista a Rai Educational, 25 luglio 1989



La dimostrazione di Newton



« Proposizione I. Teorema I. *Le aree che i corpi ruotanti descrivono, con i raggi condotti verso il centro immobile delle forze, giacciono sugli stessi piani e sono proporzionali ai tempi.*

Il tempo sia diviso in parti uguali e durante la prima parte di tempo il corpo, per la forza insita, descriva la retta AB. Durante la seconda parte di tempo, se nulla lo impedisse, proseguirebbe rettilinearmente (per la prima legge) verso c , descrivendo la linea Bc, uguale alla AB; tanto che, condotti i raggi AS, BS, cS verso il centro, le aree ASB, BSc risulteranno uguali. Ma allorché il corpo giunge in B, la forza centripeta agirà con un impulso unico ma grande, e fa sì che il corpo devii dalla retta Bc e prosegua lungo la retta BC. Si conduca cC, parallela alla BS, che incontra BC in C; una volta completata la seconda parte di tempo, il corpo (per il corol. 1 delle leggi) sarà trovato in C, sullo stesso piano del triangolo ASB. Si congiunga SC: il triangolo SBC, a causa delle parallele SB, Cc, sarà uguale al triangolo Sbc, e perciò stesso, anche al triangolo SAB. Per lo stesso argomento, se la forza centripeta agisce successivamente su C, D, E, eccetera, facendo sì che il corpo descriva nelle singole particelle di tempo le rette CD, DE, EF, eccetera, tutte queste giaceranno sul medesimo piano; e il triangolo SCD sarà uguale al triangolo Sbc, SDE a SCD, ed SEF a SDE. Dunque, in tempi uguali descriverà aree uguali su un piano immobile: e, per composizione, le somme delle aree qualsiasi SADS, SAFS staranno fra loro come i tempi impiegati a descriverle. Si aumenti, ora, il numero dei triangoli e se ne diminuisca all'infinito la larghezza; il loro perimetro ADF (per il corol. 4 del lemma III) sarà una linea curva; perciò la forza centripeta per effetto della quale il corpo è deviato costantemente dalla tangente a questa curva, agisce continuamente, e le qualsiasi aree descritte SADS, SAFS, sempre proporzionali ai tempi impiegati per descriverle, saranno anche in questo caso proporzionali agli stessi tempi, c.v.d. »



Una dimostrazione moderna

La legge fondamentale della meccanica è:

$$\mathbf{F} = m\ddot{\mathbf{r}}$$

dove \mathbf{F} è la forza applicata al punto di massa m e coordinate \mathbf{r} . \mathbf{F} e \mathbf{r} sono vettori, e i punti denotano la derivata rispetto al tempo. \mathbf{F} ha per ipotesi la forma $f(r)\mathbf{r}$, dove $f(r)$ è una funzione arbitraria di r .

Il momento angolare è, per definizione, $\mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{r}}$, e la sua derivata rispetto al tempo è:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \times m\ddot{\mathbf{r}} + \dot{\mathbf{r}} \times m\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \times f(r)\mathbf{r} + \dot{\mathbf{r}} \times m\dot{\mathbf{r}} = 0$$

perché, per ogni vettore \mathbf{v} , si ha che $\mathbf{v} \times \mathbf{v} = 0$. Quindi:

$$\mathbf{r} \times m\dot{\mathbf{r}} = \text{costante}$$

c.v.d.



Il problema dei tre corpi

« La legge di Newton è la più semplice di tutte le leggi fisiche: la sua espressione matematica, tuttavia, è un'equazione differenziale, e per calcolare le coordinate dei corpi celesti è necessario integrare questa equazione. Questo problema, uno dei più difficili dell'analisi, è ancora ben lungi dall'essere risolto, nonostante le tenaci ricerche dei geometri.

Quale sarà il moto di n punti materiali che esercitano l'uno sull'altro un'attrazione direttamente proporzionale alle loro massime e inversamente proporzionale al quadrato delle distanze?

Se $n = 2$ [...], trascurando le interazioni degli altri pianeti, l'integrazione è facile: i due corpi descrivono delle ellissi, obbedendo alle leggi di Keplero.

Le difficoltà iniziano non appena il numero n dei corpi è uguale a tre: il *problema dei tre corpi* ha finora eluso tutti gli sforzi degli analisti. »

Henri Poincaré

Il problema dei tre corpi, 1891



La gravitazione universale

Proposizione V. Teorema V. Corollario II.

La gravità, che appartiene a ciascun pianeta, è inversamente proporzionale al quadrato delle distanze dei luoghi dal centro dello stesso.

Scolio

Fino a questo punto abbiamo chiamato centripeta la forza per effetto della quale i corpi celesti sono tratti nelle proprie orbite. Ora, essa risulta essere la medesima forza di gravità, e pertanto nel seguito la chiameremo gravità. Infatti, la causa di quella forza centripeta, per effetto della quale la Luna è trattenuta nella propria orbita, deve essere estesa a tutti i pianeti, per le regole I, II e IV.

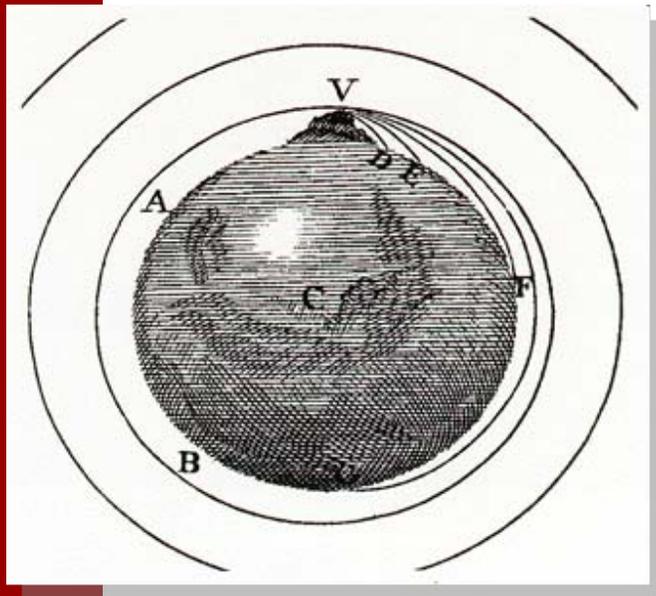
Isaac Newton, *Principi matematici di filosofia naturale* (1687)



Il moto dei proietti spiega quello dei pianeti

«È il movimento dei proiettili a spiegare come i pianeti possano essere tratti da forze centripete in orbite determinate. Se scagliamo una pietra, essa, spinta dalla sua gravità, devierà da un corso in linea retta, descriverà una traiettoria curva nell'aria e finalmente cadrà a terra. A seconda che sia maggiore la forza con la quale è stata lanciata, la pietra si spingerà più lontano. [...] Immaginiamo ora dei corpi che vengano gettati in direzione orizzontale da regioni ancora più alte: alte, per esempio, cinque, dieci, cento, mille e più miglia, o altrettanti semidiametri della Terra; allora in rapporto alla diversa velocità dei corpi e alla forza di gravità esercitata nelle singole zone, verranno descritti archi concentrici alla Terra, o variamente eccentrici rispetto ad essa. In queste traiettorie i corpi continueranno a percorrere i cieli a somiglianza dei pianeti.»

Isaac Newton, *Sistema del mondo*





Le regole newtoniane per l'indagine dei fenomeni naturali

REGOLA I

Delle cose naturali non devono essere ammesse cause più numerose di quelle che sono vere e bastano a spiegare i fenomeni.

[...]

REGOLA IV

Nella filosofia sperimentale, **le proposizioni ricavate per induzione dai fenomeni devono, nonostante le ipotesi contrarie, essere considerate vere o rigorosamente o quanto più possibile, finché non intervengono altri fenomeni**, mediante i quali o sono rese più esatte o vengono assoggettate ad eccezioni.

Questo deve essere fatto affinché l'argomento dell'induzione non sia eliminato mediante ipotesi.

Isaac Newton

Principi matematici di filosofia naturale (1687)



Hypotheses non fingo

« Fin qui ho spiegato i fenomeni del cielo e del nostro mare mediante la forza di gravità, ma **non ho mai fissato la causa della gravità**. Questa forza nasce interamente da qualche causa, che penetra fino al centro del Sole e dei pianeti, senza diminuzione della capacità, e opera non in relazione alla quantità delle *superfici* delle particelle sulle quali agisce [...] ma in relazione alla quantità di materia *solida*. La sua azione si estende per ogni dove ad immense distanze, sempre decrescendo in proporzione inversa al quadrato delle distanze.

[...]

Qualunque cosa, infatti, non deducibile dai fenomeni va chiamata *ipotesi*; e **nella filosofia sperimentale non trovano posto le ipotesi sia metafisiche, sia fisiche, sia delle qualità occulte, sia meccaniche. In questa filosofia le proposizioni vengono dedotte dai fenomeni, e sono rese generali per induzione**. In tal modo divennero note l'impenetrabilità, la mobilità e l'impulso dei corpi, le leggi del moto e la gravità. »

Isaac Newton, *Principi matematici di filosofia naturale* (1713, 2^a edizione)



Il “successo” del metodo induttivo

« Non credo che il metodo induttivo avrebbe raggiunto il prestigio che di fatto ha conseguito se Newton non avesse appoggiato questa concezione del metodo della scienza con il peso della sua impressionante autorità.

Penso anche che Bacone oggi sarebbe quasi dimenticato se Newton non si fosse espresso in favore del suo metodo. »

Karl Popper

Intervista a Rai Educational, 25 luglio 1989



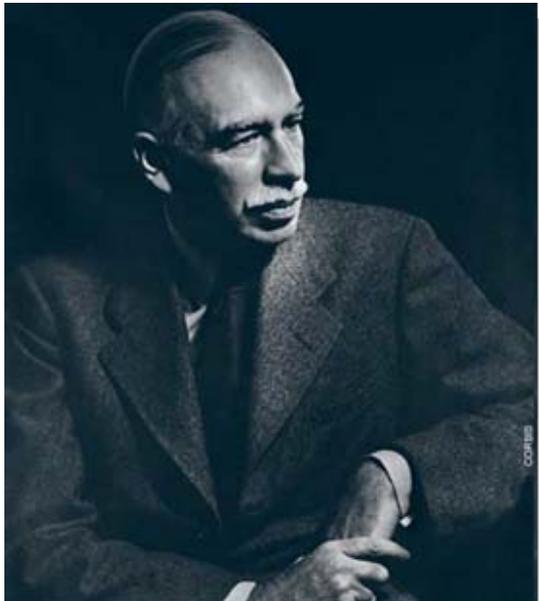


L'ultimo dei maghi

« In the eighteenth century and since, Newton came to be thought of as the first and greatest of the modern age of scientists, a rationalist, one who taught us to think on the lines of cold and untinctured reason.

I do not see him in this light. I do not think that any one who has pored over the contents of that box which he packed up when he finally left Cambridge in 1696 and which, though partly dispersed, have come down to us, can see him like that.

Newton was not the first of the age of reason. He was the last of the magicians, the last of the Babylonians and Sumerians, the last great mind which looked out on the visible and intellectual world with the same eyes as those who began to build our intellectual inheritance rather less than 10,000 years ago. Isaac Newton, a posthumous child bom with no father on Christmas Day, 1642, was the last wonderchild to whom the Magi could do sincere and appropriate homage. »



John Maynard Keynes, 1942



La biblioteca di Newton



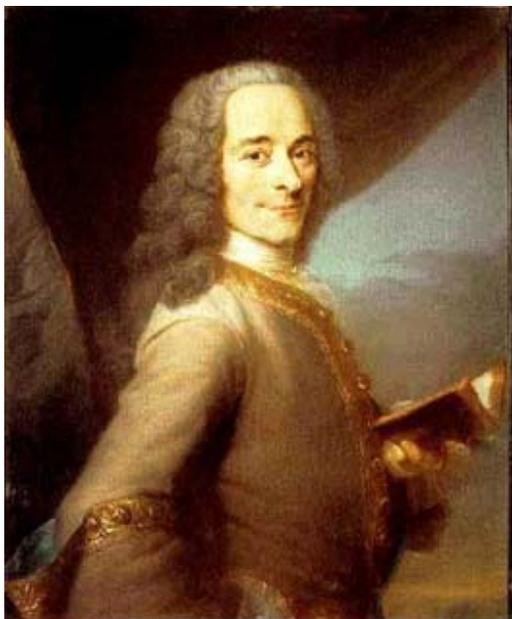
Biblioteca di Newton: analisi dei soggetti dei 1752 titoli⁶

	Titoli	%
A. Libri scientifici		
1. Alchimia, 138, e chimica, 31	169	9,5
2. Matematica	126	7
3. Medicina e anatomia	57	3,3
4. Fisica (e ottica, 15)	52	3
5. Astronomia	33	1,6
6. Altri (tra cui opere generali, 28; storia naturale, 18; zoologia, 7; botanica, 6; mineralogia, 3)	101	5,6
B. Libri non scientifici		
1. Teologia (tra cui opere generali, 205; bibbie, testamenti, e studi biblici, 99; padri della chiesa, 61; storia della chiesa, 28; controversie religiose, 28; riti e costumi ebraici, 24)	477	27,5
2. Classici greci e latini	149	8,6
3. Storia, 114 (generale, 5; antica, 19; moderna, 90), cronologia, 22, e biografie, 7	143	8,3
4. Consultazione e periodici (tra cui dizionari, 43; grammatiche, 11; periodici, 18)	90	5,3
5. Viaggi, 46; geografia, 30	76	4,5
6. Letteratura moderna (di cui inglese, 40; latina, 10)	58	3,3
7. Filosofia (antica, 9; moderna, 24) e logica, 6	39	2
8. Legge, 22; politica, 15	37	2
9. Economia (e valuta, 10)	31	1,6
10. Altri (tra cui antichità, 18; numismatica, 10; medaglie, 6)	114	6,5

⁶ Harrison, 1978, p. 59.



Dopo Newton



« Un francese che capiti a Londra trova che le cose sono molto cambiate nella filosofia come in tutto il resto. Ha lasciato il mondo pieno e lo trova vuoto. A Parigi l'universo lo si vede composto di vortici di materia sottile. A Londra nulla si vede di tutto questo. Da noi in Francia la pressione della Luna a causare il flusso del mare; presso gli inglesi il mare a gravitare verso la Luna.

[...]

Presso i cartesiani tutto avviene per effetto d'un impulso incomprendibile; per Newton, invece, in forza di un'attrazione di cui non si conosce meglio la causa. »

Voltaire, *Lettere filosofiche* (1734)



L'attrazione come "qualità occulta"

« Gli antichi filosofi si sono contentati di spiegare i fenomeni del mondo con questo genere di qualità che essi chiamavano occulte, dicendo per esempio che l'oppio fa dormire per una sua qualità occulta che lo rende adatto a procurare il sonno. È come non dire assolutamente nulla o meglio ancora, è come voler nascondere la propria ignoranza; così si dovrebbe considerare l'attrazione come una qualità occulta, in quanto la si spaccia per una qualità essenziale dei corpi; **ma poiché oggi ci si sforza di bandire dalla filosofia tutte le qualità occulte, anche l'attrazione, presa in questo senso, dovrebbe essere bandita.** »

Eulero, *Lettere a una principessa tedesca* (1760)





Letture consigliate

