

MOTO DEI GRAVI

PROFESSORESSE

NICOLETTA ALLEGRETTI

ALESSANDRA FAITELLI

TIZIANA PAZZAGLIA

CLASSE 1[°]A LICEO CLASSICO MAMIANI

A.S.2017/18

LA TEORIA ARISTOTELICA DEL MOTO

La fisica medievale, studiata da Galileo all'Università di Pisa, fa una netta distinzione tra corpi terrestri e corpi celesti. Secondo tale teoria, tutta la materia terrestre, cioè quella fisicamente accessibile all'uomo, è formata di una miscela di quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco. Ognuno di questi quattro elementi tende spontaneamente a portarsi, non appena libero di muoversi, verso il proprio "luogo naturale". La terra è l'elemento freddo e secco, che tende verso il basso; essa deve essere controbilanciata dal suo elemento contrario, il fuoco, che è caldo e secco e tende verso l'alto. Fra di essi devono esistere altri due elementi con funzioni mediatrici: l'acqua, fredda e umida, e l'aria, calda e secca. Anche l'acqua tende verso il basso, come ci viene provato dallo scorrere dei fiumi, meno però della terra, come risulta dal fatto che un pezzo di terra gettato nell'acqua affonda. L'aria invece tende in alto, come vediamo dalle bolle d'aria contenute nell'acqua che vengono a galla, meno però del fuoco la cui fiamma, pur stando nell'aria, tende a salire. I corpi materiali, nei quali, in diversa proporzione, i quattro elementi possono mescolarsi l'uno all'altro, tendono a muoversi verso il "luogo naturale" spettante all'elemento che, nel corpo, è presente in quantità maggiore. Per esempio una pietra, essendo formata in prevalenza dall'elemento terra cade verso il basso tendendo a seguire un cammino rettilineo che viene detto "moto naturale". Secondo Aristotele, inoltre, più il corpo è pesante, più grande dovrà essere la sua velocità di caduta; infatti una pietra più pesante, contenendo una maggiore quantità dell'elemento terra, avrebbe una tendenza più forte a portarsi nel suo "luogo naturale". Avendo constatato, anche, che uno stesso oggetto cade più lentamente nell'acqua che nell'aria, Aristotele pensa che la velocità di caduta debba dipendere anche dalla resistenza del mezzo. Ne conclude che la velocità di caduta debba essere proporzionale al peso dell'oggetto e inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo. Di tale spiegazioni qualitative fornisce anche una spiegazione quantitativa pensando ad una serie di facili esperienze:

- Siano A e B due sfere uguali e omogenee; la sfera A sia fatta cadere in un recipiente pieno d'acqua, la sfera B sia lasciata cadere nell'aria, Noteremo che B giunge a terra molto prima di A. Ciò significa che, dove la resistenza R del mezzo attraversato è maggiore (l'acqua), la velocità di caduta è minore: $v \sim 1/R$
- In uno stesso recipiente si facciano cadere contemporaneamente due sfere di uguali dimensioni, una più leggera e una più pesante. Quel che si osserva è la maggiore rapidità di caduta della sfera pesante. Detta P il peso della sfera, avremo allora: $v \sim P$

Dalle due relazioni si ottiene pertanto $v \sim P/R$

Secondo Aristotele, inoltre, il moto naturale non sarebbe possibile nel vuoto. Infatti nel vuoto infinito (cioè in quello democriteo), egli spiega, non vi sarebbero né un su né un giù, né alcun'altra direzione privilegiata, e quindi i corpi non saprebbero in qual senso dirigersi. Se poi un corpo si muovesse nel vuoto, non incontrando alcuna resistenza, come sostengono gli atomisti, la velocità di caduta dovrebbe essere infinita. Dunque, se esistesse il vuoto, i corpi dovrebbero restare in esso necessariamente fermi oppure, se si muovessero, dovrebbero trovarsi nello stesso istante in più luoghi,

FINALITÀ DI GALILEI E PROSA SCIENTIFICA: DAL TRATTATO AL DIALOGO

Nella polemica tra sapere tradizionale e ipotesi scientifiche, l'obiettivo è quello di "rifare i cervelli" anche quelli non specialistici, per questo, dopo il grande successo del **trattato Sidereus Nuncius-1610-** in cui espone le osservazioni fatte con il cannocchiale, Galileo abbandona il latino e sceglie di scrivere in un italiano comprensibile a tutte le persone colte. Abbandona il trattato in cui espone sistematicamente le sue tesi, e sceglie forme letterarie più complesse che mirano a persuadere il lettore attraverso argomentazioni, esempi, confutazioni degli avversari. A questi presupposti si ispirano il *Dialogo*, stampato nel 1632 e dedicato a Ferdinando II de' Medici e l'ultimo lavoro di Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche*, (il titolo non è dell'autore), vede la luce a Leyda nel 1638 in Olanda all'insaputa dell'aurora. Lo stile dei *Discorsi*, opera meno suggestiva dal punto di vista letterario, ma risolutiva dal punto di vista scientifico, segue molto da vicino quella dei *Dialoghi*. I diversi punti di vista non vengono esposti in astratto, ma si incarnano in tre interlocutori: si tratta, infatti, di un dialogo, non sistematico, diviso in quattro giornate, fra due amici defunti dell'autore, Salviati, fiorentino, che presenta le nuove concezioni di Galileo, Sagredo, veneziano, che fa da arbitro, e Simplicio, figura fittizia di filosofo peripatetico (il nome- significativo- è quello di un antico commentatore di Aristotele): lo studioso pacato e riflessivo, l'uomo curioso e aperto alle nuove idee e l'ottuso esponente della cultura ufficiale e universitaria, tanto candido da diventare comico. La sistemazione definitiva vede i *Discorsi* articolati su quattro giornate, più un'appendice nella quale Galileo riporta un suo scritto giovanile sul centro di gravità dei solidi. Delle quattro giornate, le prime due trattano della definizione di "scienza nova" e "della resistenza dei corpi solidi all'essere spezzati". Nella terza giornata, quella dedicata all'analisi del moto dei gravi, e precisamente la terza al moto dei corpi in caduta libera e la quarta a quello dei proiettili, si immagina che Salviati abbia tra le mani un trattato latino scritto dal suo amico *Accademico* (Galileo) *De motu locali*, e che lo legga e commenti insieme agli amici, solo qua e là la lettura è interrotta da domande di chiarimenti da parte dei due interlocutori. In questo modo Galileo non si rivolge solo al "lettore gentiluomo", ma anche a tutti gli scienziati del mondo, ai quali egli vuole presentare i risultati delle sue ricerche "De subiecto vetustissimo novissima promovemus scientiam..." Il problema che si è posto Galileo nel trattatello in latino *De motu*, inserito nei *Discorsi*, è quello di trovare una definizione del moto uniformemente accelerato che sia "esattamente congruente [...] a quella forma di accelerazione dei gravi discendenti di cui si serve la natura". Alla sua definizione Galileo afferma di essere stato quasi "condotto per mano" dalla constatazione che la natura fa uso, in tutte le sue opere, dei mezzi "più immediati, più semplici e più facili", Una pietra che discende dall'alto, a partire dalla quiete, acquista via via incrementi di velocità. "Mediante una medesima suddivisione uniforme del tempo, possiamo concepire che gli incrementi di velocità avvengano con la stessa semplicità" cioè la proporzionalità tra variazioni di velocità e tempo. Tra le argomentazioni utilizzate per confutare la teoria aristotelica del moto egli si serve del così detto "esperimento pensato" (**gedankenexperiment**) nel quale analizza ciò che accadrebbe in un esperimento senza però eseguirlo effettivamente. Gli

esperimenti pensati, di cui si trovano alcuni esempi già nell'antichità, come in Archimede, diventano di uso comune con Galileo e acquisteranno un ruolo significativo nel metodo scientifico poiché, straordinariamente concomitanti con episodi cruciali dello sviluppo della fisica Nell'esperimento seguente viene preso in esame il moto di corpi di peso diverso, ma di ugual natura, che cadono nello stesso mezzo. Aristotele aveva affermato che il più pesante cade più velocemente, ma Galileo riesce a confutare questa teoria sulla base di semplici considerazioni quantitative intuendo che nella caduta si sommano due diversi aspetti: la caduta in quanto tale e la resistenza dell'aria.

GALILEO CONFUTA ARISTOTELE

Da Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*, Giulio Einaudi Editore, Torino, 1990.

SIMP. Aristotele, per quanto mi sovviene, insurge contro alcuni antichi, i quali introducevano il vacuo come necessario per il moto, dicendo che questo senza quello non si potrebbe fare. A questo contrapponendosi Aristotele, dimostra che, all'opposto, il farsi (come veggiamo) il moto distrugge la posizione del vacuo; e 'l suo progresso è tale. Fa due supposizioni: l'una è di mobili diversi in gravità, mossi nel medesimo mezzo; l'altra è dell'istesso mobile mosso in diversi mezzi. Quanto al primo, suppone che mobili diversi in gravità si muovano nell'istesso mezzo con diseguali velocità, le quali mantengano tra di loro la medesima proporzione che le gravità; si che, per esempio, un mobile dieci volte più grave di un altro si muova dieci volte più velocemente. [...]

SALV.[...] E quanto al primo, 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. gr., di cento braccia, fusser talmente differenti nelle lor velocità, che all'arrivo della maggior n terra, l'altra si trovasse non avere né anco sceso dieci braccia.

SIMP. Si vede pure dalle sue parole ch'ei mostra d'haverlo sperimentato, perché ei dice: Vegiam il più grave; hor quel vedersi accenna l'haverne fatta l'esperienza.

SAGR. 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.

SALV. 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.

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

SALV. Quando dunque noi havessimo 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?

SIMP. Parmi che così debba indubitabilmente seguire.

SALV. 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 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.

SIMP. Io mi trovo avviluppato, perché mi par pure che la pietra minore aggiunta alla maggiore le aggiunga peso, e, aggiugnendole peso, non so come non debba aggiugnerle velocità, o almeno non diminuirgliela.

SALV. Qui commettete un altro errore, Sig. Simplicio, perché non è vero che quella minor pietra accresca peso alla maggiore.

SIMP. Oh, questo passa bene ogni mio concetto.

A questo punto Simplicio si sente confuso quando Salviati dimostra che la teoria aristotelica della caduta libera si contraddice da sola. Tuttavia i suoi occhi gli dicono che un oggetto pesante cade realmente più velocemente di uno leggero:

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

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

La critica di Galileo alla spiegazione aristotelica si muove contemporaneamente sul piano sperimentale e sul piano logico.

Sul piano sperimentale Galileo prova che la differenza tra i tempi di caduta di oggetti di peso molto diverso “*una palla d’artiglieria*” e una “*palla d’un moschetto*” è minima. Sul piano logico dimostra che se, come pensava Aristotele, ogni corpo ha una sua naturale velocità di caduta proporzionale al suo peso, allora l’esame della caduta di due singoli corpi e di un corpo composto dalla somma dei due porta a conclusioni opposte. Qui si esprime un concetto importante: uno scienziato che osserva un fenomeno naturale non deve lasciarsi distrarre da effetti di secondaria importanza che lo porterebbero a trascurare regolarità molto più significative. In realtà è vero che due corpi diversi, che cadono dalla stessa altezza, non toccano terra nello stesso istante ma, afferma Salviati, non è tanto importante che i tempi di arrivo siano leggermente diversi quanto il fatto che essi siano quasi uguali. Galileo pensò che questa leggera differenza nei tempi di arrivo dipendesse dagli effetti dovuti alla resistenza dell’aria quando questa agisce su corpi diversi per peso e dimensioni. La teoria aristotelica del moto non poteva ammettere il vuoto, al contrario Galileo non solo non esclude il vuoto, in cui al più verrebbe a mancare la spinta idrostatica del fluido, ma addirittura quasi lo impone, perché è solo nel vuoto che si possono osservare i moti dei gravi allo stato puro e, cioè senza impacci e accidenti dovuti all’azione perturbatrice del mezzo. Pochi anni dopo la morte di Galileo, l’invenzione della pompa a vuoto permise la conferma sperimentale delle sue asserzioni: eliminata la resistenza dell’aria, corpi di peso diverso, lasciati cadere dalla stessa altezza, arrivano a terra nello stesso istante.

La spiegazione scientifica dei fenomeni naturali dunque, secondo Galileo, deve tener presente che gli eventi osservati nell’esperienza quotidiana non sono semplici ed elementari, come credeva Aristotele, ma in realtà sono molto complessi. Quindi per interpretare un fenomeno occorre cominciare dallo studio del caso più semplice, come può essere la caduta senza resistenza, anche se questo rappresenta solo una situazione ideale. Solo in seguito, dopo aver compreso uno alla volta i singoli aspetti del fenomeno, si potrà affrontare l’evento naturale nella sua complessità.

IL METODO SPERIMENTALE

Galileo ha già osservato, nei suoi anni di studi, un certo numero di accidenti del moto di caduta dei gravi, ed è alla ricerca di un principio (di un metodo matematico) che permetta di unirli in una teoria del moto. In altre parole, Galileo conosce già i risultati a cui vuole arrivare: in primo luogo *la legge oraria* (gli spazi percorsi sono proporzionali ai quadrati dei tempi) e *la legge dei numeri dispari* (gli spazi percorsi in tempi uguali dall'inizio del moto stanno tra loro come i numeri dispari); ma a questi non è difficile aggiungerne altri, come *la legge del piano inclinato* (i tempi di discesa lungo piani inclinati di uguale altezza sono proporzionali alle lunghezze dei piani) . Quello a cui Galileo mira costruire di una teoria matematica che colleghi tra loro i risultati precedentemente acquisiti.

Nella terza giornata dei *Discorsi* Salviati, Sagredo e Simplicio discutono su alcune proposizioni del trattato latino *De Motu* relative al moto dei gravi

SAGR. Suspendete, in grazia,alquanto la lettura, (n.d.r,del trattato latino De motu) mentre io vo ghiribizzando intorno a certo concetto pur hora cascatomi in mente ; per la spiegatura del quale, per mia e per vostra più chiara intelligenza, fo un poco di disegno. [...] Vedesi dunque anco in questo semplice calcolo, gli spazii passati in tempi uguali dal mobile che, partendosi dalla quiete, va acquistando velocità conforme all'accrescimento del tempo, esser tra loro come i numeri impari ab unitate 1,3,5,e, congiuntamente presi gli spazii passati, il passato nel doppio tempo esser quadruplo del passato nel sudduplo, il passato nel tempo triplo esser nonuplo, ed in somma gli spazii passati essere in duplicata proporzione de i tempi, cioè come i quadrati di essi tempi

SIMPL. 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 dei suoi gravi discendenti, 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 arrear qualche esperienza di quelle che si è detto esservene molte, che in diversi casi s'accordano con le conclusioni dimostrate.

E' a questo punto, per rispondere a questa richiesta, che Galileo inserisce nei *Discorsi* la celebre narrazione del canaletto inclinato: una pallina di bronzo viene fatta cadere per diverse distanze lungo un piano inclinato (un espediente per aumentare il tempo di caduta, infatti in questo modo si possono misurare più facilmente i tempi perché la velocità del corpo è minore di quella in caduta libera e per contro i tempi di caduta sono maggiori): i tempi misurati pesando la quantità d'acqua caduta in un bicchiere da un recipiente forato, mostrano una relazione quadratica tra spazi e tempi. Da questa esperienza plausibilmente Galileo ricava la legge oraria del moto dei gravi.

SALV. [...] Circa dunque all'esperienze, non ha tralasciato l'Autore (n.d.r,autore del trattato latino De motu) di farne ; e per assicurarsi che l'accelerazione de i gravi

naturalmente discendenti segua nella proporzione sopradetta, molte volte mi sono ritrovato io a farne la prova nel seguente modo, in sua compagnia.

In un regolo, o voglian dir corrente, di legno, lungo circa 12 braccia, e largo per un verso mezo braccio e per l'altro tre dita, si era in questa minor larghezza incavato un canaletto, poco più largo d' un dito; tiratolo drittissimo, e, per haverlo ben pulito e liscio, incollatovi dentro una carta di pecora zannata e lustrata al possibile, si faceva in esso scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotondata e pulita [...] Fatta e stabilita precisamente tale operazione, facemmo scendere 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 hora 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 loro come i quadrati de i tempi, e questo per tutte le inclinazioni del piano, cioè del canale nel quale si faceva scender la palla; dove osservammo ancora, i tempi delle scese per diverse inclinazioni mantener squisitamente tra loro quella proporzione che più in basso troveremo essergli assegnata dimostrata dall'Autore.

Si tratta senza dubbio non di una pura osservazione ma di un esperimento progettato e interpretato sulla base di una teoria preesistente, che consentirà di desumere, a partire dai risultati di esperimenti condotti su un piano inclinato, delle leggi valide per il moto su piani di ogni pendenza, e quindi anche quando l'angolo del piano raggiunge 90° (caduta libera). Il problema che si è posto Galileo nel trattatello in latino *De motu*, inserito nei *Discorsi*, è quello di trovare una definizione del moto uniformemente accelerato che sia "esattamente congruente [...] a quella forma di accelerazione dei gravi discendenti di cui si serve la natura". Alla sua definizione Galileo afferma di essere stato "condotto per mano" dalla constatazione che la natura fa uso, in tutte le sue opere, dei mezzi. L'esperienza descritta (e probabilmente realizzata) da Galileo serve non per dimostrare una legge già conosciuta ma per estrarne una dai dati sperimentali. E' plausibile un primo esperimento eseguito da Galileo per ricercare la legge sia quello così detto dei "campanelli" e che dovrebbe essere stato realizzato con un piano inclinato analogo a quello che viene usato successivamente per le misure con l'orologio ad acqua. Se lungo un piano inclinato si pongono 5 campanelli ad ugual distanza tra di loro, i singoli squilli, prodotti dalla pallina al passaggio sotto i campanelli, si vanno via via avvicinando nel tempo, mostrando che la velocità aumenta durante la discesa. L'idea di Galileo è quella di spostare i campanelli fino a quando i vari squilli si susseguono con lo stesso intervallo, individuando così le posizioni raggiunte dalla pallina in intervalli di tempo uguali. Tali posizioni seguono la legge dei numeri dispari.