

Un percorso didattico su forze e moto da Aristotele a Galileo

Silvia Pirollo, Liceo Artistico Leon Battista Alberti, Firenze

1. Introduzione

In questo lavoro è riportato un percorso didattico che riguarda alcuni argomenti di cinematica e di dinamica elementare. Si parte dalle concezioni aristoteliche sul moto e, dopo un breve cenno alle teorie medievali, si arriva a studiare alcuni aspetti del pensiero e dell'opera di Galileo.

L'impostazione di questo lavoro nasce dall'idea che le difficoltà di molti studenti nell'apprendimento della fisica siano dovute a "preconcezioni di senso comune che si trovano spesso anche nei filosofi della natura pregalileiani. Lo studio del dibattito scientifico che ha caratterizzato il periodo di transizione tra la fisica aristotelica e quella newtoniana potrebbe aiutarci a far emergere negli studenti tali preconcezioni e suggerirci metodi per poterle confutare efficacemente." [1].

Nel percorso si è cercato di seguire una via alternativa al manuale, basandosi sulla convinzione che [2]: "L'educazione manualistica della scienza distrugge l'idea che la scienza sia una realtà storica, e inculca l'immagine di una scienza dogmatica"; come riportato anche nel riferimento [2], Khun sottolinea il carattere dogmatico dell'insegnamento scientifico identificandolo come "un'educazione rigida e limitata forse più che ogni altro tipo di educazione". Anche altri autori [3] sostengono che sarebbe molto più formativo impartire un insegnamento della scienza non come dogma ma come ricerca "la ricerca è infatti la parte fondamentale dell'impresa scientifica". Nella realtà, invece, ci sono delle profonde discordanze tra l'effettiva pratica scientifica e la didattica della scienza.

In questo percorso si sono affiancate al manuale le memorie originali e il laboratorio storico, come suggerito da più parti anche in letteratura [3]: "con una presentazione delle memorie storiche inserite nel loro contesto culturale e con una riproposizione degli esperimenti storici, lo studente può entrare nel vivo della ricerca dell'epoca, può capire la dinamica non univoca tra teoria ed esperimento". Risulta quindi più naturale, in questo contesto, individuare le relazioni tra la storia e la storia della scienza, della filosofia, della tecnica. L'impostazione storica degli argomenti di meccanica trattati in questo percorso, seguendo la lettura diretta dei testi per lo studio dell'opera di Galileo, era già stata recentemente sperimentata attraverso il lavoro in classe, riportando risultati positivi, come descritto nel riferimento [4].

La metodologia utilizzata ha inoltre permesso di mettere in luce aspetti teorici, sperimentali e storici, costituendo una buona introduzione ai problemi dell'effettiva ricerca scientifica.

Lo scopo è stato anche quello di dare la possibilità agli studenti di crearsi una visione più completa della ricerca scientifica, in modo da cogliere il percorso delle idee, e la consapevolezza che "i risultati faticosamente e solo temporaneamente raggiunti non sono affatto scissi da un'estrema bellezza creativa" [3]. In questo contesto, è possibile, a mio avviso, coinvolgere attivamente nelle discipline scientifiche anche quegli studenti che non si sentono particolarmente motivati da un approccio di tipo puramente logico-scientifico.

L'argomento scelto, come sottolineato da Arons [5], costituisce un ricco contesto per mettere in evidenza molti aspetti del pensiero scientifico moderno e l'evoluzione di alcuni concetti semplici ma fondamentali. È importante a mio avviso, infatti, affrontare anche da un punto di vista scientifico oltre che filosofico, la rivoluzione culturale avvenuta nel XVII secolo quando si "rinunciò all'idea che i corpi celesti fossero fatti di sostanze diverse da quelle della Terra e si accettò la concezione che tutto l'universo, che iniziò ad essere concepito come un tutto, fosse governato dalle stesse leggi naturali. Il modo in cui ogni individuo guarda a se stesso e al suo posto nell'universo è profondamente condizionato dall'eredità proveniente da Galileo, Cartesio, Newton e altri filosofi del diciassettesimo secolo" [2]. Seguendo un percorso tradizionale, è difficile cogliere la centralità nella storia della scienza degli argomenti considerati.

Il percorso sviluppato intende dunque seguire “un’impostazione problematica dei contenuti, che può essere garantita solo dalla loro contestualizzazione”. Si è cercato, utilizzando le parole di Bruner [6] di “non sostituire alla scienza la storia della scienza” ma “di tenere conto dei processi vivi del fare scienza e non di proporre un resoconto della “scienza finita”, come viene presentata nella maggioranza dei libri di testo. A questo scopo, vengono evidenziati non solo gli enormi successi del lavoro di Galileo, ma anche i suoi errori e suoi ripensamenti. Tra gli obiettivi dell’insegnamento scientifico indicati da Arons [5] troviamo quello di sviluppare la capacità di riconoscere che i concetti scientifici sono inventati dall’intelligenza e dalla creatività umana non essendo oggetti che si scoprono in natura, e quello di capire che i concetti e le teorie scientifiche non sono definitivi, ma in costante ridefinizione e modificazione.

Un altro obiettivo di questo percorso e in particolare della parte su Galileo, è stato quello di discutere sul ruolo degli esperimenti nello sviluppo delle idee scientifiche. Gli studiosi della scienza che si sono occupati dello scienziato non concordano sull’effettivo ruolo delle misure nell’opera di Galileo, nonostante che si riconosca in lui l’inventore del metodo sperimentale. Di sicuro un ruolo altrettanto importante è rivestito dagli esperimenti ideali o mentali, attraverso i quali Galileo ci convince delle sue idee, portandoci a prevedere con il ragionamento i risultati di esperimenti di fatto mai realizzati. Dallo studio dell’opera di Galileo, si capisce come la ricerca qualitativa svolga un ruolo fondamentale nello sviluppo scientifico.

La metodologia utilizzata nel trattare gli argomenti proposti, ha cercato di seguire l’approccio narrativo indicato da Bruner [6] come centrale per la comprensione dei fenomeni scientifici; “una narrazione comporta un sequenza di eventi, ed è dalla sequenza che dipende il significato”.

Il percorso è stato iniziato in una terza del Liceo Artistico e concluso nella quarta; i prerequisiti a questo lavoro sono la parte introduttiva di cinematica fino alla velocità e al moto rettilineo uniforme. Il tempo impiegato per realizzare il percorso nella sua interezza, dalle forze fino al principio di inerzia, è di circa sei mesi, un tempo di sicuro superiore a quello necessario a trattare gli stessi argomenti seguendo il libro di testo. Come suggerito da alcuni autori [2,5], a mio avviso, è comunque positivo diminuire il numero di argomenti trattati per dare agli studenti la possibilità di comprendere lo sviluppo di alcune idee scientifiche. Infatti “ogni problematica importante ha bisogno di tempi molto lunghi per essere appresa in modo significativo” [2].

Il percorso si può dividere in due parti: la prima ha come scopo la costruzione del concetto di forza: viene presa in esame la concezione aristotelica del moto, la concezione di forza e movimento nelle teorie medievali, e infine la forza come interazione. La seconda parte riguarda lo studio dell’opera di Galileo ed in particolare il moto di caduta libera fino alla legge oraria nel moto uniformemente accelerato, il moto parabolico con il principio di composizione dei moti, la conservazione del moto (principio di inerzia), il principio di relatività.

2. Il concetto di forza

Uno studio [7] sulle concezioni mentali degli studenti, riporta come sia possibile affiancare le idee di forza che appaiono più radicate e diffuse ad “illustri precedenti storici”, anche se gli studenti non possiedono visioni organiche e consapevoli come quelle di una teoria fisica. Le ricerche, condotte con metodologie diverse, concordano nell’individuare alcune caratteristiche mentali dominanti degli studenti dominanti. Si evidenzia come la maggioranza degli studenti possieda una visione di forza vicina alla teoria medievale di *impetus*, una percentuale minore ma comunque considerevole, abbia idee vicine alla concezione aristotelica del moto e solo una esigua minoranza abbia un’idea di forza vista come interazione. Le ipotesi che vengono formulate per le strategie di intervento didattico, sono tuttavia molto diverse tra loro. Tra queste uno studio (riportato nel riferimento [7]) che sembra trovare maggiore conferma nei risultati delle ricerche, indica un approccio che mira alla riflessione sui concetti, e che contiene un esame approfondito della storia della scienza perché permette agli studenti “di trovare precedenti ai loro modi di vedere la realtà, mostra loro come queste idee si sono evolute nel tempo e indica quindi una possibile strada da percorrere”.

Seguendo questo approccio, sono state affrontati i “precedenti storici” indicati come i più significativi ed è stata quindi affrontata l’evoluzione del concetto di forza. Il tempo necessario a sviluppare questi argomenti è stato di circa 18 moduli orari compreso un test d’ingresso e la verifica finale.

2.1 Teoria aristotelica

I punti principali della teoria aristotelica del moto sono stati trattati seguendo il manuale PPC [8]: viene descritta la teoria dei luoghi naturali, la distinzione tra meccanica dei corpi celesti e di quelli terrestri. La caduta dei gravi era per Aristotele un esempio di moto naturale, nel quale il corpo, dopo una fase iniziale, raggiunge una velocità di caduta costante che risulta direttamente proporzionale al peso del corpo e inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo in cui il corpo si muove. Aristotele aveva inoltre esaminato il moto violento dei corpi che si distingue dal moto naturale. Il moto in genere richiede una causa: per i moti celesti la causa è un principio interno, un atto puro, mentre nel mondo sublunare il movimento in qualsiasi altra direzione diversa dal luogo naturale è considerato violento, e dovuto a chi lo provoca. Quindi uno dei principi base di questa teoria è che ogni moto ha una causa motrice. Inoltre il motore deve essere a contatto con l’oggetto mosso, rendendo impossibile l’azione a distanza. Per Aristotele la forza è generatrice di velocità e quando cessa la forza anche il moto cessa [3]. Vengono sottolineati questi aspetti che saranno completamente ribaltati da Galileo nel principio della conservazione del moto poi ripreso da Newton come principio di inerzia.

La teoria del moto di Aristotele riesce a spiegare, in modo qualitativo, la maggior parte dei fenomeni dell’esperienza comune attraverso un’osservazione diretta e privilegiando l’aspetto metafisico rispetto a quello quantitativo che è quasi del tutto assente [3]. Continuava ad essere alla base degli studi scientifici fino al XVII secolo anche se con alcune contraddizioni e controversie che ne avevano provocato alcune modifiche. La teoria aristotelica costituisce quindi il contesto culturale nel quale si è sviluppata anche l’opera di Galileo.

2.2 Forza come *impetus*

Per quanto riguarda la teoria del moto, un significativo spostamento dalle posizioni del filosofo greco, si è verificato nel trecento con la teoria dell’*impetus*. Per mantenere in movimento un oggetto ci deve essere una forza, ma, a differenza della teoria aristotelica, non è sempre necessaria una causa esterna: la causa motrice si sposta infatti dal motore all’oggetto mosso. La causa del movimento di un corpo, si trova all’interno del corpo stesso. La spinta impressa da un motore viene immagazzinata nel mobile come un “capitale di forza”, un *impetus*, che “è continuamente ridotto dalla resistenza dell’aria e dalla gravità che fa deviare la pietra in una direzione contraria a quella in cui l’impeto era naturalmente predisposto a farla muovere” (Buridano riportato in [7]). Quindi l’*impetus* è una forza intrinseca, contenuta nel mobile, che produce il movimento.

Le ricerche [7] indicano che, l’idea di una forza trasmessa dal motore all’interno dell’oggetto mosso, è presente in molti studenti: questo è probabilmente dovuto al fatto che l’esperienza quotidiana sembra avere molti punti in comune con la teoria dell’*impetus*.

Riflettiamo sul fatto che il moderno concetto di forza, è molto diverso; la forza è un qualcosa che agisce sugli oggetti anzi tra due oggetti e in nessun modo è contenuta nei corpi che si muovono, anche se la storia della fisica insegna che prima di Newton le idee dominanti localizzavano le forze negli oggetti.

2.3 Forza come interazione

Questa parte del percorso ha seguito un approccio di tipo esplorativo, utilizzando il laboratorio e alcune indicazioni didattiche riportate nei riferimenti [9,10]. Si può suddividere in quattro sezioni.

La prima ha riguardato l’introduzione al concetto di forza. Siamo partiti da una riflessione sulla terminologia: le parole forza, energia, interazione, sforzo, lavoro appartengono al linguaggio comune ma fanno parte anche del linguaggio scientifico che obbedisce a regole diverse e dove

ciascuna parola assume uno specifico significato. Nel caso del concetto di forza, il linguaggio e l'esperienza comune devono essere ripensati perché possono indurre difficoltà nell'apprendimento, come sottolineato da più autori [5,7,9]. “Accanto all'esperienza quotidiana che vede il movimento strettamente legato alla presenza di una forza, ha un ruolo importante anche il condizionamento del linguaggio quotidiano...: forza come velocità, come fatica o energia, forza come qualcosa che si fornisce o si possiede”.

Sono state poi fatte esplorazioni sul comportamento dei materiali soggetti all'applicazione di forze; abbiamo analizzato gli effetti causati dall'applicazione di forze e non è stato difficile accorgersi che si producono delle deformazioni, ma si può anche variare lo stato di quiete o di moto. Inizialmente abbiamo quindi osservato forze prodotte da sforzi muscolari, seguendo la concezione animistica di forza, presente nell'antichità, secondo la quale è sempre qualcuno che esercita una forza.

Abbiamo, successivamente, fatto alcune osservazioni sulle interazioni possibili di materiali come lastre di ferro, plastica, legno, calamite, oppure bacchette di materiale isolante strofinate e pezzettini di carta. In ognuno di questi casi è stato chiesto di capire se c'erano delle forze in gioco, su che cosa agiscono o da chi sono esercitate. Abbiamo anche osservato, attraverso una molla da laboratorio sospesa verticalmente, che lo stesso effetto di deformazione poteva essere ottenuto in modi diversi: tirandola con le mani, appendendole pesetti, appendendo alla molla un pezzetto di ferro che poi viene attratto da un magnete. Si nota quindi che forze di natura diversa possono produrre lo stesso allungamento nella molla.

Al termine di questa sezione, abbiamo osservato che non solo essere animati possono applicare forze, ma anche interazioni tra oggetti inanimati. Arons [5] suggerisce di distinguere tra forze attive e passive: esempi di forze attive sono la trazione e la spinta da parte di corpi animati, la forza gravitazionale, le forze elettriche e magnetiche. Le forze passive sono quelle che nascono in risposta a quelle attive per esempio nella compressione di una molla, oppure nella deformazione di un oggetto a causa di un peso.

E' importante sottolineare come le forze, a differenza della teoria medievale dell'*impetus*, sono azioni esterne agenti sul corpo e non proprietà presenti nei corpi stessi.

La seconda sezione di questo lavoro ha avuto lo scopo di introdurre al concetto di forza come interazione e di analizzare la forza gravitazionale.

Partendo da casi semplici, si lavora su diagrammi di forze, chiedendo agli studenti di descrivere anche a parole le forze disegnate indicando da chi è esercitata la forza e su chi agisce, come suggerito da Arons [5].

Negli esempi osservati fino a questo momento, è stato possibile notare come le forze sono nate sempre dall'interazione tra due corpi. Nella realtà, quindi, non esistono forze ma solo corpi che interagiscono e possiamo chiamare forza una rappresentazione fisica (un modello) di questa interazione. Per meglio far risaltare la simmetria del fenomeno, invece che vedere la forza come un qualcosa che agisce su un oggetto, legata ad una sua “sorella” che agisce su un altro corpo, è più chiaro considerare la forza come interazione tra due corpi [11]. Se parliamo semplicemente di forza che agisce su un corpo, deve essere chiaro che stiamo considerando solo un lato dell'interazione.

Alcune considerazioni sulla forza di attrazione gravitazionale seguono dall'osservazione diretta di cosa accade applicando un peso a una molla o un elastico. Il peso è in grado di produrre deformazioni ed in particolare la deformazione della molla, quindi ci possiamo convincere del fatto che anche il peso è una forza. Ci chiediamo però qual è il secondo corpo che interagisce con il pesetto. A questo punto si espone il concetto che la forza di attrazione gravitazionale è una forza di interazione a distanza di cui noi osserviamo l'effetto solo su uno dei corpi interagenti.

Nella terza sezione, si cerca di costruire un misuratore di forza. Possiamo misurare la forza, mettendo in relazione l'intensità dell'effetto prodotto, nei casi in cui tale effetto non è soggettivo ed è riproducibile.

Si analizzano a questo scopo tre esperimenti: allungamento di una molla da laboratorio, allungamento di un elastico e variazione della distanza tra due magneti che levitano in conseguenza

dell'applicazione di pesi. Dall'analisi dei grafici realizzati riportando le misure ottenute in questi tre esperimenti si osserva che un misuratore di forze deve presentare una dipendenza lineare tra l'effetto causato e l'intensità della forza applicata. Si sceglie quindi come misuratore di forza una molla opportunamente tarata e si svolge la taratura.

Al termine di questa parte vengono mostrati agli studenti dei dinamometri a molla.

La quarta parte ha avuto come obiettivo quello di lavorare sul concetto di forza come interazione, mettendo anche in evidenza come questa si realizza con la stessa intensità e in verso opposto tra i due corpi. Alcuni esperimenti qualitativi come il tiro alla fune e il trainare un oggetto, servono per individuare i sistemi interagenti e capire chi esercita una forza e su che cosa. Successivamente si realizza una esperienza in cui è possibile effettuare la misura della forza di interazione: due studenti si tirano tramite due dinamometri collegati per la parte sensibile, per mettere in evidenza, attraverso la lettura della misura dei dinamometri, che l'interazione ha uguale intensità. Questo esperimento è importante perché permette di effettuare una misura diretta dell'intensità dell'interazione anche se in un sistema molto semplice. E' possibile realizzare altre prove: si agganciano due dinamometri per la parte sensibile e, mantenendo fermo uno dei due, si tira l'altro e viceversa.

L'ultima esperienza di questa parte, ha riguardato l'osservazione dell'interazione magnetica. Su due carrelli che potevano scorrere su una rotaia, erano fissati dei magnetini in modo da attirarsi e a ciascun carrello era agganciato un dinamometro. L'esperienza consisteva nel cercare di allontanare i due carrelli e leggere l'intensità della forza di interazione sui due dinamometri. L'esperienza è stata ripetuta applicando magneti di diversa intensità sui due carrelli, e mettendo sui carrelli masse diverse, ed è stato possibile osservare in ogni configurazione l'uguaglianza delle letture sui dinamometri.

3. Galileo

La parte centrale del lavoro che si è svolto, ha riguardato lo studio dell'opera di Galileo. Gli obiettivi contenutistici sono stati:

- a. introduzione della grandezza fisica accelerazione
- b. studio del moto uniformemente accelerato
- c. moto di un oggetto in un mezzo (attrito viscoso)
- d. legge oraria del moto uniformemente accelerato
- e. analisi di alcune caratteristiche del moto di caduta
- f. conservazione del moto (principio di inerzia)
- g. principio di composizione dei moti
- h. principio di relatività

Gli obiettivi metodologici:

- a. uso dell'esperimento ideale: attraverso il ragionamento siamo portati da Galileo a prevedere il risultato di esperienze, senza il bisogno di realizzarle materialmente;
- b. processo di idealizzazione: per esempio levare con il pensiero la resistenza dell'aria nel moto di caduta libera. Possono essere analizzati i fenomeni naturali raggiungendo dei risultati conoscitivi anche considerando inizialmente dei sistemi fisici semplificati rispetto alla realtà ;
- c. L'abbandono della spiegazione causale e dinamica in favore di un'analisi puramente cinematica del moto [3]. Limitare in modo consapevole l'ambito della sua ricerca, in modo da chiarire un fenomeno alla volta, rifiutando come dice Arons [5] "una linea di condotta aristotelica intesa a fornire fin dall'inizio della ricerca una spiegazione di tutti gli aspetti del moto di caduta";
- d. La formulazione di una ipotesi e la progettazione di un esperimento (moto di caduta lungo un piano inclinato) volto a verificare la validità dell'ipotesi stessa.

Anche prima di Galileo, c'erano stati filosofi naturali attenti osservatori della natura, ma la grande novità introdotta da Galileo è stata quella di progettare deliberatamente un esperimento allo scopo di effettuare una verifica dell'ipotesi.

- e. l'utilizzo del passaggio al limite; per esempio nell'esperimento ideale del "piano perfettamente levigato", attraverso il quale Galileo giunge (citando Arons [5]) ad un "primo approccio corretto al principio di inerzia". E' utile sottolineare questo tipo di processo, come possibile metodo di ragionamento.

Lo studio dell'opera di Galileo, è stato svolto partendo direttamente dalla lettura in classe di alcuni testi scelti dai *"Discorsi e Dimostrazioni intorno a due nuove scienze"* ed in particolare dalla Giornata Prima e dalla Giornata Terza e successivamente alcuni brani dalla Giornata Seconda del *"Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo"* [12,13]. Galileo riesce infatti ad essere molto chiaro ed efficace nell'esprimere i nuovi concetti, espone attraverso le parole di Sagredo e Simplicio le critiche e i dubbi che nascono in chi studia per la prima volta questi argomenti. Gli studenti hanno mostrato una certa difficoltà iniziale nella comprensione del testo: abbiamo quindi letto insieme sempre poche righe alla volta, seguite dal commento guidato di quanto letto; in alcuni casi prima la lettura individuale, poi la discussione collettiva. Le difficoltà di comprensione mostrate dagli studenti, sono tuttavia molto diminuite con il procedere delle pagine lette.

Nel seguito sono riportati solo alcuni dei brani effettivamente letti in classe, ritenuti significativi nello sviluppo dell'esposizione del percorso.

3.1 "Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze"

3.1.1 Giornata Prima

Le letture dei brani da questa giornata hanno avuto come obiettivo il capire che tutti i corpi cadono insieme, indipendentemente dal loro peso nei mezzi molto rarefatti e che le differenze che noi osserviamo nella quotidianità sono dovute all'influenza del mezzo sulla caduta. Prima di cominciare abbiamo ripreso la teoria di Aristotele e invitato gli studenti a farsi una loro idea sull'argomento anche attraverso l'osservazione della caduta di corpi diversi lasciati liberi nello stesso momento; invitandoli a utilizzare anche un foglio di carta disteso o accartocciato.

a) *..mobili grandi e i piccoli ancora, essendo della medesima gravità in spezie, si muovono con pari velocità.*

La lettura è cominciata con alcuni brani dalla Giornata Prima nei quali Salviati, mediante l'utilizzo dell'esperimento ideale, critica l'idea aristotelica secondo la quale i corpi cadono con velocità costante proporzionale al peso dell'oggetto e inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo. In particolare, siamo partiti dalle parole in cui Salviati e Sagredo concordano sull'evidenza dell'impossibilità che la velocità di caduta dei gravi sia proporzionale al peso, infatti:

Salviati: io grandemente dubito che Aristotele non sperimentasse mai quanto sia vero che due pietre, una più grave dell'altra dieci volte, lasciate nel medesimo instante cader da un'altezza, v. g., di cento braccia, fusser talmente differenti nelle lor velocità, che all'arrivo della maggior in terra, l'altra si trovasse non avere né anco sceso dieci braccia.

Ma per convincere in modo definitivo i suoi interlocutori, Salviati ricorre ad un esperimento ideale nel quale vengono collegate insieme due pietre di peso diverso: è facile immaginare che il corpo più leggero venga trascinato da quello più pesante e quindi aumenti la sua velocità di caduta rispetto a quando è libero, e quello più pesante venga rallentato dal primo. Se poi pensiamo alle due pietre collegate come ad un corpo unico di peso maggiore di entrambi, notiamo che questo cadrà ad una velocità intermedia tra quella che avrebbero avuto le due pietre singolarmente, giungendo quindi a contraddire la teoria aristotelica. Molto chiare sono le parole di Galileo:

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

noi congiugnissimo il più tardo col più veloce, questo dal più tardo sarebbe in parte ritardato, ed il tardo in parte velocitato dall'altro più veloce. Non concorrete voi meco in quest'opinione?

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 muoverà con velocità minore di otto gradi: ma le due pietre, congiunte insieme, fanno una pietra maggiore che quella prima, che si muoveva con otto gradi di velocità: adunque questa maggiore si muove men velocemente che la minore; che è contro 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

In questo modo Salviati conclude che

Salv. Concludiamo per ciò, che i mobili grandi e i piccoli ancora, essendo della medesima gravità in spezie, si muovono con pari velocità.

Nei passi successivi, Simplicio si mostra incredulo:

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.

Salviati fa quindi notare che, la sua idea che tutti i corpi arrivino a terra contemporaneamente si discosta poco dalla realtà, alla quale è sicuramente più vicina della legge aristotelica di velocità proporzionale al peso.

Salv. ... 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: ora vorreste dopo queste due dita appiattare le novantanove braccia di Aristotele, e parlando solo del mio minimo errore, metter sotto silenzio l'altro massimo

Nelle ultime parole di questo passo, Galileo sottolinea come sia importante al fine di capire i fenomeni che stiamo osservando e descriverli mediante leggi universali, scegliere tra tutti gli effetti, quelli più importanti: nella realtà osserviamo che corpi con peso diverso, lasciati cadere da una stessa altezza non arrivano a terra contemporaneamente ma che le differenze sono comunque piccole e quindi non proporzionali ai pesi; Galileo capì che la differenza nei tempi di arrivo dei corpi era un effetto secondario che successivamente spiegherà con l'influenza del mezzo.

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

Salviati passa poi a criticare l'idea che la velocità di caduta degli oggetti sia inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo, attraverso l'osservazione che alcuni corpi che in aria cadono, in acqua invece galleggiano, determinando una inversione del verso della velocità al cambiare del mezzo, inversione che non viene descritta dalla legge di Aristotele.

Salv. ... quando fusse vero che l'istesso mobile in mezzi di differente sottilità e rarità, ..si movesse con velocità nell'aria maggiore che nell'acqua secondo la proporzione della rarità dell'aria a quella dell'acqua, ne seguirebbe che ogni mobile che scendesse per aria, scenderebbe anco nell'acqua: il che è tanto falso, quanto che moltissimi corpi scendono nell'aria, che nell'acqua non pur non scendono, ma sormontano all'in su.

Inoltre Salviati osserva che le differenze di velocità tra corpi di peso diverso sono molto più evidenti in acqua che in aria, e quindi non viene rispettata la proporzione inversa della resistenza del mezzo:

Salv. ... come avete voi fatto a non osservar accidenti frequentissimi e palpabilissimi, e non badare a due corpi che nell'acqua si muoveranno l'uno cento volte più velocemente dell'altro, ma che nell'aria poi quel più veloce non

supererà l'altro di un sol centesimo? come, per esempio, un uovo di marmo scenderà nell'acqua cento volte più presto che alcuno di gallina, che per l'aria nell'altezza di venti braccia non l'anticiperà di quattro dita;

Fino a questo momento, Salviati ci ha convinto che in aria, corpi con lo stesso peso specifico cadono pressoché insieme istante per istante e raggiungono terra contemporaneamente e indipendentemente dal peso, inoltre che non è vera l'ipotesi aristotelica che la velocità di caduta sia inversamente proporzionale alla resistenza del mezzo. A questo punto prende la parola Sagredo e chiede:

Sagr. a me sarebbe cosa gratissima il sentire, quali siano le proporzioni che nell'un caso e nell'altro vengono osservate.

Salviati ci dice quindi, che questi quesiti lo hanno impegnato per molto tempo, lasciandoci immaginare come il percorso delle idee scientifiche sia difficile, tortuoso e tutt'altro che dogmatico come la scienza può apparire ad una visione distorta. Utilizza alcune espressioni che evidenziano questa ricerca “.. ci ho molte volte pensato: vi dirò il discorso fattoci attorno, e quello che ne ho in ultimo ritratto.....cominciasti a comporre insieme.....e m'accorsi...”.

L'osservazione chiave è quella che le differenze reciproche di velocità di caduta tra oggetti di peso diverso sono maggiori nei mezzi con maggiore resistenza (considera a questo scopo mezzi sempre più densi: l'aria, l'acqua e l'argento vivo) e sempre minori via via che il mezzo è sempre più rarefatto e, con un passaggio al limite, conclude che:

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

E di fronte alle perplessità di Simplicio ribadisce:

Salv. Noi siamo su 'l volere investigare quello che accaderebbe a i mobili differentissimi di peso in un mezzo dove la resistenza sua fusse nulla...; ..già che manchiamo di cotale spazio, andremo osservando ciò che accaggia ne i mezzi più sottili e meno resistenti, ..ché se noi troveremo, in fatto, i mobili differenti di gravità meno e meno differir di velocità secondo che in mezzi più e più cedenti si troveranno e che finalmente, ancor che estremamente diseguali di peso, nel mezzo più d'ogni altro tenue, se ben non voto, piccolissima si scorga e quasi inosservabile la diversità della velocità, parmi che ben potremo con molto probabil coniettura credere che nel vacuo sarebbero le velocità loro del tutto eguali.

In questa fase, sarebbe estremamente utile inserire l'osservazione in laboratorio della caduta di corpi all'interno di un tubo in cui è stato fatto il vuoto; è tuttavia stato impossibile a causa della mancanza della strumentazione necessaria nella scuola; è possibile ma sicuramente meno efficace e suggestivo vedere filmati o video.

c) Influenza del mezzo sul moto di caduta

L'ultima pagina che abbiamo letto dalla Giornata Prima, riguarda l'influenza del mezzo sul moto di caduta dei gravi. È un brano a mio avviso molto importante nel quale Galileo descrive il fenomeno in termini molto chiari: è possibile individuare qui sia la legge che noi conosciamo dell'attrito viscoso cioè la proporzionalità tra forza d'attrito e velocità del corpo sia il principio di inerzia, espresso attraverso l'osservazione che il corpo soggetto a due forze uguali e opposte smette di accelerare e comincia a muoversi di moto rettilineo uniforme. La descrizione del moto di caduta come moto continuamente accelerato viene enunciata qui, ma trattata in modo più ampio ed esauriente nella Giornata Terza dei Discorsi.

Salv. ... Dico per tanto che un corpo grave ha da natura intrinseco principio di muoversi verso 'l comun centro de i gravi, .. con movimento continuamente accelerato, ed accelerato sempre egualmente, cioè che in tempi eguali si fanno aggiunte eguali di nuovi momenti e gradi di velocità. E questo si deve intender verificarsi tutta volta che si rimovessero tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni, tra i quali uno ve ne ha che noi rimuover non possiamo, che è l'impedimento del mezzo pieno, mentre dal mobile cadente deve esser aperto e lateralmente mosso: al qual moto

trasversale il mezzo, benché fluido cedente e quieto, si oppone con resistenza or minore ed or maggiore, secondo che lentamente o velocemente ei deve aprirsi per dar il transito al mobile; il quale, perché, come ho detto, si va per sua natura continuamente accelerando, vien per conseguenza ad incontrar continuamente resistenza maggiore nel mezzo, e però ritardamento e diminuzione nell'acquisto di nuovi gradi di velocità, sì che finalmente la velocità perviene a tal segno, e la resistenza del mezzo a tal grandezza, che, bilanciandosi fra loro, levano il più accelerarsi, e riducono il mobile in un moto equabile ed uniforme, nel quale egli continua poi di mantenersi sempre.

A conclusione delle letture di questa Giornata, si esegue un esperimento di caduta dei gravi attraverso il lancio di oggetti dalla finestra della scuola. L'altezza della finestra è di 16,80 m dal suolo e si sceglie di lanciare due oggetti di peso diverso in particolare uno con peso doppio dell'altro. Si prendono i valori dei tempi di caduta e si osserva se i due corpi, lasciati cadere contemporaneamente, cadono insieme oppure ci sono differenze. Ripetiamo diverse misure, cambiando anche l'esecutore dell'esperimento: non riusciamo a rilevare differenze nei tempi perché la reazione dello sperimentatore per la misura del tempo è comunque superiore alla differenza nel tempo di caduta tra i due oggetti, ma osserviamo che il corpo più peso tocca terra per primo anche se per pochissimo. Analizziamo il perché, alla luce della spiegazione di Galileo e anche quali sono le differenze tra la sua interpretazione e la teoria aristotelica del moto. La misura del tempo di caduta ci servirà successivamente, dopo aver introdotto la legge oraria per ottenere una misura, seppur piuttosto indicativa, dell'accelerazione di gravità.

3.1.2 Giornata Terza

Nella Giornata Terza, Galileo descrive il moto uniformemente accelerato, partendo dalla definizione di accelerazione e arrivando alla legge oraria. Dal punto di vista metodologico, si parte dalla formulazione di una ipotesi su quale sia la definizione della grandezza fisica accelerazione in grado di descrivere il moto di caduta dei gravi; dall'ipotesi vengono dedotte alcune caratteristiche o "passioni" del moto uniformemente accelerato (tra cui la legge oraria), viene quindi progettato un esperimento in grado di verificare l'ipotesi assunta oppure di smentirla.

E' stato molto interessante seguire il percorso di Galileo sia nell'introduzione dei nuovi contenuti, ma anche per poter studiare il metodo di lavoro applicato allo studio di una fenomenologia molto significativa come la caduta dei gravi.

La Giornata Terza si apre con il trattato scritto in latino "De motu locali", diviso in tre parti: la prima sul moto uniforme, la seconda sul "moto naturalmente accelerato", la terza sul moto dei proiettili, affrontato nella Giornata Quarta. I tre personaggi protagonisti dell'opera, leggono e commentano le parole del trattato scritto in realtà da Galileo stesso. Sul moto uniforme abbiamo letto soltanto la definizione e l'avvertenza, poiché avevamo già affrontato questo argomento in modo esauriente in precedenza. Ci siamo quindi concentrati sulla parte del moto naturalmente accelerato. Già nella prima pagina viene spiegato dall'Autore, il metodo che verrà seguito per affrontare il moto dei gravi:

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 [dalla nostra definizione], sembrano esattamente corrispondere e coincidere con ciò che gli esperimenti naturali presentano ai sensi.

... 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.

Ci siamo soffermati a discutere su quest'ultima riflessione di Galileo convinto che la natura segua sempre la via più semplice: molti studenti si sono dimostrati in accordo con questa idea, ma abbiamo anche notato che non sempre i fenomeni che osserviamo hanno una spiegazione "semplice", anzi spesso le leggi scientifiche che interpretano i fenomeni naturali sono molto più complesse di quello che può apparire.

a) Ipotesi

Applicando questo criterio di semplicità, l'Autore formula la sua ipotesi: poiché nella caduta di un grave la velocità aumenta, *perché non dovrei credere che tali aumenti avvengano secondo la più semplice e più ovvia proporzione?* e quindi *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.*

In questo modo e con queste parole abbiamo dato in classe la definizione della nuova grandezza fisica accelerazione nel moto uniformemente accelerato. Alcune righe più in basso, Galileo ricava dunque la relazione tra velocità e tempo:

E così ci sembra di non discordare affatto dalla retta ragione se ammettiamo che l'intensità della velocità cresca secondo l'estensione del tempo [la velocità sia proporzionale al tempo].

Salviati invita poi i suoi compagni a proporre i loro dubbi e difficoltà. Segue quindi una interessante discussione sugli infiniti nella quale Sagredo esprime le sue difficoltà nel comprendere come un mobile partendo da fermo acquisti, dopo un certo tempo, un valore finito di velocità, pur passando da un infinito numero di valori di velocità; per Sagredo risulta difficile immaginare che la somma di un numero infinito di termini possa portare ad un valore finito; il dubbio sorge poiché l'intervallo di tempo finito nel quale la velocità passa da zero ad un valore finito è suddivisibile in infinite parti e quindi così lo è la velocità. Questo brano ha offerto l'occasione di riprendere i paradossi di Zenone che gli studenti conoscevano per averli trattati in filosofia, di paragonare le difficoltà matematiche incontrate sia al tempo di Zenone ma ancora al tempo di Galileo, nell'interpretazione di questi fenomeni. Abbiamo potuto qui sottolineare che la matematica di cui disponeva Galileo non era di aiuto nel risolvere i quesiti che si è trovato ad affrontare e che è stata probabilmente la causa del fatto che gli è mancata spesso la sistematicità e il rigore nel dimostrare le sue geniali intuizioni. La riflessione sugli infiniti costituirà un utile aggancio al momento di affrontare analoghi argomenti in matematica.

Salviati ribatte a Sagredo sul problema degli infiniti utilizzando un ragionamento che abbiamo letto. In primo luogo Salviati osserva che possiamo facilmente valutare la velocità di un grave nel momento che tocca il terreno:

Quanta dunque sia la velocità d'un grave cadente, lo potremo noi senza errore conietturare dalla qualità e quantità della percossa impressa quando il grave cade su "una materia cedente".

Salviati dunque utilizza questa osservazione per dire che se si lascia cadere "un mazzo sopra un palo" questo si conficcherà nel terreno ed è possibile produrre un effetto sul palo che varia con continuità, da zero ad un valore finito, a seconda dell'altezza da cui si lascia cadere il mazzo. Ma poiché l'altezza è collegata alla velocità finale raggiunta dal mazzo anche quest'ultima può variare con continuità. Sebbene questo ragionamento sia convincente, contiene due idee errate e cioè in primo luogo che la velocità finale nella caduta sia proporzionale allo spazio percorso invece che al tempo come aveva dichiarato precedentemente. Come sostiene Giusti [14], riprendendo le parole di Koyré [15], le possibili motivazioni di ciò potrebbero essere dovute alla "preminenza della geometria dello spazio sull'esperienza temporale, centralità della teoria delle proporzioni nella geometrizzazione del moto" che ha l'effetto di indurre a trasformare dipendenze monotone in dipendenze lineari: dall'osservazione che la velocità cresce al crescere dello spazio percorso si passa facilmente ad ipotizzare che cresca in modo proporzionale.

Inoltre l'effetto provocato dalla percossa non è proporzionale alla velocità: infatti oggi sappiamo che l'effetto osservato è proporzionale all'energia cinetica raggiunta dall'oggetto e quindi al quadrato della velocità.

In questa pagina, è contenuta anche un'altra idea che abbiamo sottolineato e cioè il fatto che uno stesso fenomeno può essere interpretato in modo diversi e, in questo caso, la difficoltà di Sagredo

meglio osservata, può dimostrare il contrario di quello che appariva ad una prima visione, e convincerci che la velocità di un grave nella fase iniziale di caduta è infinitamente piccola:

Salv. ...Voi dite, parervi che l'esperienza mostri, che a pena partitosi il grave dalla quiete, entri in una molto notevole velocità; ed io dico che questa medesima esperienza ci chiarisce, i primi impeti del cadente, benché gravissimo, esser lentissimi e tardissimi e quindi Veggano ora quanta sia la forza della verità, mentre l'istessa esperienza che pareva nel primo aspetto mostrare una cosa, meglio considerata ci assicura del contrario .

Nelle righe successive, è contenuta l'importante osservazione della simmetria tra i moti di salita e discesa di un grave lanciato verso l'alto: Galileo utilizza questa intuizione per convincere Sagredo che la velocità di un corpo in caduta libera passa con continuità attraverso tutti i gradi di velocità partendo da zero così come succede quando, dopo una spinta iniziale, sale verso l'alto.

Di grande importanza metodologica è la risposta di Salviati ad una affermazione di Sagredo:

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

...

Salv. 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 sentenzie sono state prodotte... le quali fantasie, con altre appresso, converrebbe andare esaminando e con poco guadagno risolvendo... Per ora basta al nostro Autore che noi intendiamo che egli ci vuole investigare e dimostrare alcune passioni di un moto accelerato (qualunque si sia la causa della sua accelerazione)

Con queste parole Galileo ci chiarisce la sua idea di metodo nelle indagini scientifiche: in primo luogo è necessario giungere ad una analisi dettagliata delle caratteristiche del fenomeno che si sta analizzando e non guardare alle cause in ogni caso fisiche e non metafisiche che verranno analizzate in fasi successive dell'indagine.

Galileo ritorna ora sulla definizione di accelerazione attraverso le parole di Sagredo che afferma di intuire che la velocità nel moto di caduta cresca proporzionalmente con lo spazio percorso, invece che con il tempo trascorso; Salviati dichiara qui di aver avuto anche lui inizialmente la stessa intuizione. In effetti sono possibili entrambi queste definizioni di accelerazione, perché corrispondono ai criteri di semplicità ricercate da Galileo per la spiegazione di fenomeni naturali, e possono essere intuitivamente accettate come vere. Galileo sceglie quindi una delle due definizioni di accelerazione (formula una ipotesi) che poi verificherà mediante un esperimento appositamente studiato a questo scopo. È interessante sottolineare questo percorso di Galileo nel giungere alla definizione corretta di una nuova grandezza perché costituisce un esempio di come spesso la strada per giungere alle leggi comunemente accettate sia in realtà tortuosa e piena di errori e ripensamenti. Secondo Arons [5]: "...il concetto di accelerazione fornisce un altro esempio del fatto che le idee scientifiche sono create dall'attività dell'immaginazione e dell'intelligenza umana....Galileo adotta la seconda quantità $[\Delta v/\Delta t]$ soprattutto perché ha un'intuizione....Questo episodio illustra in maniera quanto mai chiara il ruolo dell'invenzione e mostra che talvolta sono possibili delle alternative. Inoltre, dimostra che la scelta talora è dettata da criteri di eleganza e semplicità".

Dopo queste discussioni possiamo quindi accettare che

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

b) "Passioni" del moto uniformemente accelerato

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

Salv. 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.

Abbiamo letto quest'ultima affermazione di Salviati, con l'idea di verificarla successivamente attraverso le misure sul piano inclinato. L'idea che un corpo, cadendo al suolo acquisti una certa velocità che dipende solo dall'altezza da cui è caduto e non dal percorso seguito, è probabilmente alla base dell'intuizione di utilizzare il piano inclinato per la verifica sperimentale della sua ipotesi di moto di caduta dei gravi. Galileo giustifica questa assunzione con l'osservazione del moto del pendolo che, essendo per lui molto convincente, assume quasi un carattere di dimostrazione. Seguendo Galileo, dall'osservazione del moto di un pendolo che oscilla ci possiamo convincere che la velocità finale che acquista un corpo che cade dipende solo dall'altezza da cui è stato lasciato: la velocità è infatti tale da consentirgli di risalire fino all'altezza da cui era partito. Il pendolo di Galileo è un normale pendolo semplice, ma sull'asta verticale del sostegno ci sono dei fori che permettono di inserire dei fermi in modo da diminuire la lunghezza del filo del pendolo. La palla sospesa al filo raggiunge sempre la stessa altezza da cui è partita pur variando la lunghezza del filo e quindi indipendentemente dal percorso seguito.

Attraverso il Catalogo Multimediale dell'Istituto e Museo della Scienza di Firenze [16], abbiamo osservato l'animazione sul pendolo di Galileo, che è conservato nella Sala IV del Museo.

Dopo questa supposizione, abbiamo letto il teorema 1 proposizione 1 che riguarda la relazione tra velocità media e velocità finale in un moto di caduta:

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.

La verifica di questa proprietà del moto accelerato è stata fatta utilizzando i grafici velocità tempo: come nel moto rettilineo uniforme anche nel moto rettilineo uniformemente accelerato, l'area della figura geometrica delimitata dall'asse dei tempi, dalla retta della velocità, dall'asse delle ordinate e dalla parallela a tale asse tracciata per $x = t$, rappresenta la distanza percorsa nel tempo t . E' quindi semplice verificare il teorema precedente, osservando l'equivalenza tra il rettangolo con una dimensione pari alla metà della velocità finale e il triangolo rettangolo con un cateto pari al tempo t e un cateto pari alla velocità finale.

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.

Anche questa "passione" è stata verificata con l'utilizzo del grafico velocità-tempo nel moto uniformemente accelerato: l'area sottesa dalla velocità è in effetti proporzionale al quadrato del tempo.

COROLLARIO 1

Di qui è manifesto che, se dal primo istante o inizio del moto avremo preso successivamente un numero qualsiasi di tempi eguali, come ad esempio AD, DE, EF, FG, nei quali siano percorsi gli spazi HL, LM, MN, NI, questi spazi staranno tra di loro come i numeri impari ab unitate, cioè come 1, 3, 5, 7: questa è infatti la proporzione tra gli eccessi dei quadrati delle linee che si eccedono egualmente e il cui eccesso è eguale alla minima di esse, o vogliam dire tra i numeri quadrati consecutivi ab unitate. Pertanto, mentre i gradi di velocità aumentano in tempi eguali secondo la serie dei numeri semplici, gli spazi percorsi nei medesimi tempi acquistano incrementi secondo la serie dei numeri impari ab unitate.

Gli studenti sono stati invitati a ricavare il corollario, noto come legge dei numeri dispari, dalla legge oraria; hanno trovato semplice da ricordare questo modo alternativo di esprimere la legge oraria, ma anche affascinante il sottolineare questa regolarità nella legge.

c) Verifica sperimentale

Simplicio evidenzia, a questo punto, che l'Autore ha ricavato le "passioni" in modo anche convincente, ma da un'ipotesi di proporzionalità tra velocità e tempo che non è mai stata in qualche modo provata. Galileo descrive quindi l'esperimento che dichiara di aver svolto *in compagnia dell'Autore, molte volte*.

Ci siamo brevemente soffermati sul dibattito tra gli storici della scienza, del ruolo rivestito dall'aspetto sperimentale nell'opera di Galileo. Sebbene sia apparso fin dall'inizio del 1900 come il fondatore del metodo sperimentale, e quest'ultimo come l'elemento caratterizzante della scienza moderna, con lo sviluppo degli studi galileiani alcuni storici hanno messo in luce come Galileo sia stato soprattutto "l'artefice di un profondo cambiamento culturale" [3], arrivando a dubitare che molti esperimenti siano in realtà stati effettivamente svolti [15]. In contrasto con queste idee, alcuni studi [17,18], hanno mostrato come Galileo fosse in grado di realizzare l'esperimento del piano inclinato con l'orologio ad acqua ed ottenere risultati della precisione da lui indicata. E' stato, a mio avviso, interessante notare come non sia tuttora risolto il problema del ruolo rivestito dagli esperimenti nell'opera di Galileo: da una parte la tradizione positivista che indica la centralità della parte sperimentale, dall'altra il ruolo fondamentale del ragionamento, delle argomentazioni, degli esperimenti ideali che spesso portano a prevedere in modo convincente il risultato di esperienze, rendendo inutile lo svolgimento materiale di esse.

Prima di leggere il brano nel quale Galileo descrive nei dettagli l'esperimento che racconta di aver svolto, notiamo che era impossibile una verifica diretta dell'ipotesi assunta di proporzionalità tra velocità finale e tempo: in primo luogo il moto di caduta libera è molto veloce e risulta piuttosto difficile una misura efficace del tempo specialmente considerando la strumentazione disponibile ai tempi di Galileo. In secondo luogo è impossibile la misura diretta della velocità finale perché l'unica possibilità sarebbe quella di misurare il tempo impiegato a percorrere uno spazio molto piccolo in prossimità del suolo [8]. Quindi Galileo sceglie di verificare sperimentalmente non l'ipotesi direttamente ma una "passione" ricavata dall'ipotesi stessa. La "passione" che descrive di aver verificato è la legge oraria ossia la proporzionalità tra spazio percorso e il quadrato del tempo impiegato. Inoltre il tipo di moto scelto non è quello di caduta libera dove sarebbero rimaste le difficoltà in una misura affidabile del tempo, ma il moto di discesa lungo il piano inclinato. Questo presuppone, come abbiamo già notato, che il moto di caduta di un oggetto lungo un piano inclinato sia dello stesso tipo che lungo la verticale. Galileo aveva già giustificato questa assunzione mediante le osservazioni sul pendolo e sulla velocità finale di caduta lungo un piano inclinato.

Salv. ... 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. 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; dove osservammo ancora, i tempi delle scese per diverse inclinazioni mantener esquisitamente tra di loro quella proporzione che più a basso troveremo essergli assegnata e dimostrata dall'Autore. 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 bicchiero 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.

Abbiamo ripetuto in classe l'esperimento svolto da Galileo, evitando di utilizzare apparecchiature sofisticate come rotaia a cuscino d'aria dotata di fotocellule, perché avrebbe snaturato l'evoluzione del percorso svolto e la scelta didattica di seguire lo sviluppo storico delle idee. In modo molto semplice e "domestico", abbiamo utilizzato un profilato metallico di alluminio di lunghezza pari a 4m su cui abbiamo fatto rotolare senza strisciare delle sferette di legno. Purtroppo la misura del tempo è stata svolta con strumenti moderni ma solo per mancanza di tempo: la costruzione di un orologio ad acqua anche molto semplice, seppur molto interessante ed istruttiva, avrebbe richiesto un po' di tempo in più, sebbene non molto. Abbiamo comunque letto con attenzione e capito il metodo utilizzato da Galileo per misurare il tempo e anche immaginato come avremmo potuto realizzarlo. Le misure svolte hanno quindi avuto in primo luogo lo scopo di verificare la proporzionalità tra spazio e quadrato del tempo: abbiamo misurato il tempo in funzione di cinque valori dello spazio percorso per tre diverse inclinazioni del piano intorno ai 6°. Per far riflettere meglio gli alunni sul significato della legge quadratica, abbiamo anche misurato i tempi impiegati a percorrere tre spazi in proporzione con i numeri 1, 4, 9 in modo da verificare che il tempo impiegato a percorrere lo spazio 4 è doppio e per lo spazio 9 è triplo di quello impiegato a percorrere lo spazio 1. L'analisi dei dati ottenuti con questo esperimento è stata svolta utilizzando il foglio elettronico nel laboratorio di informatica.

Una volta verificata la validità della legge oraria per mezzo dell'esperimento, ritorniamo a riflettere sull'idea iniziale di Galileo di velocità proporzionale allo spazio percorso invece che al tempo come successivamente ipotizzato. Questa idea, seppur intuitiva, è in contraddizione con la seconda: dalla legge oraria e dalla proporzionalità tra velocità e tempo si ricava infatti la relazione tra velocità e spazio nel moto uniformemente accelerato: $v = \sqrt{2as}$ e quindi non una dipendenza lineare di v da s ma come $s^{1/2}$. Con tabelle e grafici si cerca di capire la differenza nei due casi.

A conclusione delle letture tratte dai "Discorsi", era prevista la visita al museo della Scienza della sala con gli strumenti di Galileo che tuttavia non è stato possibile realizzare. Abbiamo quindi utilizzato il catalogo multimediale disponibile in rete [16] per osservare il piano inclinato con le animazioni per la verifica della legge dei numeri dispari, lo strumento per la verifica del teorema delle corde e di nuovo della legge dei numeri dispari.

3.2 "Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo"

La parte sul Dialogo ha avuto lo scopo di affrontare alcuni degli altri argomenti introdotti da Galileo ed in particolare: indipendenza e compatibilità dei moti, la conservazione del moto, il principio di relatività.

Le letture svolte sono state tratte dalla Giornata Seconda e, anche in questo caso, abbiamo seguito l'ordine scelto da Galileo nella sua opera. Nei brani letti, Galileo chiarisce il concetto che, dai fenomeni scelti dagli aristotelici come prova contro la rotazione della Terra, non si riesce a ottenere nessuna informazione al riguardo. Vengono quindi esaminati alcuni fatti: la caduta di un sasso dall'albero maestro di una nave, tiri di colubrina dall'altezza di una torre, oggetti lanciati da un cavallo in corsa, tiri di artiglieria verso oriente e occidente, tiri di artiglieria da una carrozza in corsa in direzione del moto o in direzione opposta, volo degli uccelli.

Attraverso il dialogo tra Simplicio e Salviati, qui sostenitore della teoria copernicana, e Sagredo come osservatore neutrale, Galileo espone e sostiene le nuove idee sulla struttura dell'Universo, distruggendo ad una ad una tutte le argomentazioni contrarie.

Filo conduttore dal punto di vista dei contenuti è il principio di relatività del moto:

qualunque moto venga attribuito alla Terra, è necessario che a noi, come abitatori di quella ed in conseguenza partecipiamo del medesimo, ei resti del tutto impercettibile e come s'e' non fusse, mentre che noi guardiamo solamente alle cose terrestri.

Il primo brano ha riguardato il problema della caduta del sasso dall'albero maestro della nave. Al contrario di quanto affermano Simplicio e gli aristotelici, Galileo è convinto del fatto che il sasso cade ai piedi dell'albero della nave, sia che questa sia ferma sia che si muova. E' quindi impossibile da un esperimento analogo come il lancio di un oggetto dalla cima di una torre, giudicare se la Terra è ferma o in movimento. In questo esempio sono contenute sia l'idea di carattere inerziale del moto, sia di indipendenza dei moti nelle direzioni verticali e orizzontali. Galileo ritiene infatti che il moto della Terra, rimanga impresso indelebilmente nel sasso dopo il distacco dalla torre e che si debba combinare con il moto verticale senza alterarlo. Per giustificare il moto orizzontale perpetuo del sasso anche dopo essersi staccato dalla nave, Galileo mediante un esperimento ideale, porta Simplicio ad ammettere che, in assenza di impedimenti esterni, un moto continua in modo perpetuo. In questo brano, c'è non soltanto l'utilizzo dell'esperimento ideale, ma anche una idealizzazione della realtà nell'immaginare una palla perfettamente rotonda ed un piano *esquisitamente* pulito, che già avevamo notato nello studio della caduta dei gravi, e nell'azione di levare l'aria con il pensiero. Galileo spiega come per mantenere in moto un corpo non è necessario un motore e che quindi, il moto uniforme al pari della quiete, è uno stato naturale dei corpi, nel quale essi persistono se non trovano impedimenti esterni.

Per convincerci meglio dell'idea della conservazione del moto, abbiamo citato anche un altro esperimento ideale, che utilizza il risultato precedentemente enunciato sul moto dei pendoli: l'altezza raggiunta da una palla sospesa ad un filo che viene lasciata andare senza spinta è la stessa da cui è partita anche se il percorso del pendolo viene in seguito deviato. Allo stesso modo, una palla lasciata cadere su un piano inclinato di una certa altezza, salendo su un secondo piano, raggiungerebbe nuovamente la stessa altezza anche diminuendo l'inclinazione del secondo piano. Seguendo un processo al limite, se il secondo piano diventasse orizzontale, il moto della palla continuerebbe all'infinito.

Galileo spiega in modo chiaro che il moto orizzontale della nave, resta impresso nel sasso per quello che oggi chiamiamo principio di inerzia anche se non è più a contatto con la nave; il moto di caduta del sasso risulta quindi dalla composizione di due moti indipendenti: il moto rettilineo uniforme in direzione orizzontale e il moto rettilineo uniformemente accelerato in direzione verticale, dando luogo ad un moto risultante parabolico. Viene spiegato con chiarezza che i due moti sono indipendenti e specificato che se per esempio aumenta la velocità della nave, aumenterà il tragitto orizzontale percorso dal sasso, pur lasciando invariato il moto verticale e quindi in particolare il tempo impiegato a raggiungere il suolo.

SAGR. Quando sia vero che l'impeto col quale si muove la nave resti impresso indelebilmente nella pietra, dopo che s'è separata dall'albero, e sia in oltre vero che questo moto non arrechi impedimento o ritardamento al moto retto all'ingiù, naturale alla pietra, è forza che ne segua un effetto meraviglioso in natura. Stia la nave ferma, e sia il tempo della caduta d'un sasso dalla cima dell'albero due battute di polso: muovasi poi la nave, e lascisi andar dal medesimo luogo l'istesso sasso, il quale, per le cose dette, metterà pur il tempo di due battute ad arrivare a basso, nel qual tempo la nave avrà, verbigratia, scorso venti braccia, talché il vero moto della pietra sarà stato una linea trasversale, assai più lunga della prima retta e perpendicolare, che è la sola lunghezza dell'albero: tuttavia la palla l'avrà passata nel medesimo tempo. Intendasi di nuovo il moto della nave accelerato assai più, sì che la pietra nel cadere dovrà passare una trasversale ancor più lunga dell'altra; ed insomma, crescendo la velocità della nave quanto si voglia, il sasso cadente descriverà le sue trasversali sempre più e più lunghe, e pur tutte le passerà nelle medesime due battute di polso: ed a questa similitudine, quando in cima di una torre fusse una colubrina livellata, e con essa si tirassero tiri di punto bianco, cioè paralleli all'orizzonte, per poca o molta carica che si desse al pezzo, sì che la palla andasse a cadere ora lontana mille braccia, or quattro mila, or sei mila, or dieci mila etc., tutti questi tiri si spedirebbero in tempi eguali tra di loro, e ciascheduno eguale al tempo che la palla consumerebbe a venire dalla bocca del pezzo sino in terra, lasciata, senz'altro impulso, cadere semplicemente giù a perpendicolo. Or par meravigliosa cosa che nell'istesso breve tempo della caduta a piombo sino in terra dall'altezza, verbigratia, di cento braccia, possa la medesima palla, cacciata dal fuoco, passare or quattrocento, or mille, or quattromila, ed or diecimila braccia, sì che la palla in tutti i tiri di punto bianco si trattenga sempre in aria per tempi eguali.

Per capire meglio questo tipo di moto, Galileo parla anche di lunghezza di tiri da una colubrina posta sulla cima di una torre: il tempo impiegato dalla palla lanciata per arrivare a terra è lo stesso

indipendentemente dalla velocità orizzontale iniziale; quello che cambia è la gittata ovvero la distanza in orizzontale percorsa. Una situazione analoga a quella del sasso che cade dalla cima di un albero si verifica lasciando cadere un oggetto da un cavallo in corsa: dove cade l'oggetto? Abbiamo discusso in classe su questo fenomeno e gli studenti hanno trovato più difficoltà a dare una interpretazione corretta di quello che accade in questo caso rispetto al caso della nave: mentre per la nave nessuno aveva dubbi sul fatto che il sasso cadesse ai piedi dell'albero, per oggetti lasciati cadere da un cavallo ma anche da un'auto in corsa, le risposte erano varie e in classe si è aperta una discussione. Facendo poi il parallelo con il caso della nave, tutti si sono convinti e hanno capito quello che succede in realtà.

Simplicio sposta poi l'attenzione sull'altra presunta prova dell'immobilità della Terra, cioè quella dei tiri d'artiglieria. Infatti, per i sostenitori della teoria tolemaica, se la Terra ruotasse, non dovrebbero essere simmetriche, come invece si osserva, le gittate dei proiettili sparati da cannoni in direzione verso Oriente e Occidente. I tre personaggi discutono sul modo di eseguire facilmente un esperimento simile a quello dei cannoni e, su suggerimento di Sagredo, si pensa di prendere una carrozzetta scoperta dove accomodare *un balestrone da bolzoni a mezza elevazione*:

SAGR. Credo che prova assai accomodata sarebbe il pigliare una carrozzetta scoperta, ed accomodare in essa un balestrone da bolzoni a mezza elevazione, acciò il tiro riuscisse il massimo di tutti, e mentre i cavalli corressero, tirare una volta verso la parte dove si corre, e poi un'altra verso la contraria, facendo benissimo notare dove si trova la carrozza in quel momento di tempo che 'l bolzone si ficca in terra, sí nell'uno come nell'altro tiro; ché così potrà vedersi per appunto quanto l'uno riesce maggior dell'altro.

Salviati chiede a Simplicio qual è un modo per ottenere lanci di una stessa gittata e Simplicio sostiene che oltre l'ovvio modo di tenere ferma la carrozza, sarebbe necessario sparare in modo più intenso verso la direzione di moto e in modo più debole nella direzione opposta. Ragionando sul fatto che, se si muove la carrozza, si muovono anche il bolzone e l'arco, Salviati arriva a dire che le differenze di velocità, sono date direttamente dalla carrozza.

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

Sagredo ha ancora un dubbio sul moto degli uccelli; il problema è come possono gli uccelli tenere dietro alla rotazione della Terra. Salviati chiarisce che è l'aria che si muove insieme alla Terra che trascina gli uccelli nella rotazione e che quindi anche il volo di questi risulta indipendente dal moto della Terra.

Abbiamo ora letto il famoso brano della stiva della nave nel quale Galileo espone il principio di relatività.

Al termine di questa parte, la classe ha partecipato ad un laboratorio presso l'IMSS sulla relatività, durante il quale sono state mostrate interessanti simulazioni su tutte le prove ed esperimenti descritti in questa parte del Dialogo.

Ringraziamenti

Si ringrazia tutto il gruppo di lavoro metodologico epistemologico coordinato dal Prof. Carlo Fiorentini del progetto IRRE di Educazione Scientifica all'interno del quale nasce questo percorso.

Le discussioni ed il clima estremamente costruttivo che si è creato sono stati per me fondamentali nella creazione delle convinzioni che sono alla base di questo lavoro, ed alla mia formazione in genere.

5. Bibliografia

- [1] Gianni Bonera, *Galileo oggi*, Università degli studi di Pavia, 1995, p. 9.
- [2] C. Fiorentini, Immagini della scienza e competenze scientifiche, in F. Cambi, M. Piscitelli, *Complessità e narrazione*, Roma, Armando, 2005, pp. 85-114.
- [3] F. Bevilacqua, a cura di, *Storia della fisica, Un contributo per l'insegnamento della fisica*, Franco Angeli Editore, p.13, p. 29, p. 30, pp. 72-80, pp. 88-97.
- [4] P. Falsini, La natura del movimento tra astronomia, cosmologia fisica, religione e società, in F. Cambi, M. Piscitelli, *Complessità e narrazione*, Roma, Armando, 2005, pp. 223-247.
- [5] A. B. Arons, *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, 1992, p.83, p. 85, p. 50, p. 51, p. 37
- [6] J. Bruner, *La cultura dell'educazione*, Feltrinelli, 1997.
- [7] N. Grimellini Tomasini, G. Segré, *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, Firenze, La Nuova Italia, 1991, pp. 139-179
- [8] Project Physics Course, *Progetto Fisica*, seconda edizione, Zanichelli, 1985
- [9] M. Michelini, L. Santi, R.M. Sperandio, a cura di, *Proposte didattiche su forza e movimento, le tecnologie informatiche nel superamento dei nodi concettuali in fisica*, Forum, Udine 2002
- [10] G. Bagni, L. Barsantini, C. Fiorentini, Percorso didattico sulle forze, in *Naturalmente*, 2, 1998, pp. 53-56
- [11] C. Hellingman, Le forze sono sorelle gemelle?, *La Fisica nella Scuola*, XXV, 2, 1992
- [12] Galileo, *Opere volume 2*, a cura di Franz Brunetti, UTET, 2005
- [13] A. Frova, M. Marenzana, *Parola di Galileo*, Biblioteca Universale Rizzoli, Terza Edizione, 2000.
- [14] Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, introduzione a cura di Enrico Giusti, Einaudi, 1990, p. XXVIII
- [15] A. Koyré, *Studi galileiani*, Einaudi, 1976
- [16] Catalogo multimediale dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze: <http://galileo.imss.firenze.it/indice.html>
- [17] T. Settle, An experiment in the History of Science, *Science*, 1961, vol. 133 n. 3445, pag. 19-23.
- [18] S. Drake, *Galileo. Una biografia scientifica*, Il Mulino, 1988.
- [19] E. Bellone, *I grandi della scienza- Galileo, le opere e i giorni di una mente inquieta*, Le Scienze, 1998