

IL PROBLEMA DELLA CADUTA DEI GRAVI IN GALILEO

(di Mario Bonfadini)

1. PREMESSA

Lo studio del comportamento dei corpi in caduta libera ha una storia lunga e interessante. È uno degli esempi più vistosi che può illustrare come si evolvono teorie e metodi nella attività scientifica, in particolare nello studio dei fenomeni fisici. Ci mostra, infatti, come la scienza sia costretta a modificare le sue teorie con il mutare del contesto culturale, con l'affinarsi degli strumenti usati nelle osservazioni e negli esperimenti, con l'esigenza di rendere conto con precisione e rigore del procedimento seguito nella elaborazione dei contenuti teorici..

E' necessario fare riferimento alla storia del progresso scientifico nei secoli precedenti a Galileo. Questo permette di inquadrare bene la questione che intendiamo affrontare, evidenziare tutto ciò che già era stato studiato, chiarito e risolto dai predecessori, e quindi far risaltare gli aspetti tipici ed originali dovuti agli approfondimenti dello scienziato pisano.

In ambito divulgativo, sulla presente questione troppe volte troviamo descrizioni approssimative dal punto di vista storico. Vengono attribuiti a Galileo delle intuizioni che erano già state formulate da altri, si esagera l'apporto delle sue riflessioni e dei suoi esperimenti, veri o pensati che siano, trascurando di intravedere nei testi del nostro scienziato possibili intuizioni di concetti e leggi più innovative. Tanto questa negligenza non incide sulla consistenza del carico dei meriti che gli vengono attribuiti. non si intravede l'opportunità di aggiungerne altri.

La nostra rassegna storica sulla questione della caduta di gravi deve risalire fino ad Aristotele. Galileo imposta gran parte delle sue novità in un contesto di critica a una interpretazione ancora ingenua e ferma delle dottrine dello stagirita. Non entriamo in merito alle fondatezze delle supposizioni di Galileo o ai metodi da lui usati nel dibattito e nel confronto.

Gli scritti di Aristotele furono introdotti nella cultura occidentale ad opera soprattutto degli studiosi arabi (università spagnole). Essi furono tradotti in tempi diversi; il trattato intitolato "Fisica" fu tradotto verso il 1140 dall'arabo in latino. Nella cultura del mondo occidentale cristiano l'accoglienza a tali opere avvenne gradualmente, non senza contrasti e riserve. Fu proprio l'esigenza di una presentazione critica della fisica di Aristotele a fare da incentivo all'approfondimento dello studio di varie questioni della meccanica. Tra gli studiosi più attenti e critici ricordiamo Nicola di Oresme, Giovanni Buridano e i maestri di Oxford (sec. XIII).

E' indispensabile quindi fare una rassegna anche del cammino fatto dal 1200 in poi nel commentare e quindi confutare, rettificare superare Aristotele. In effetti di cammino ne è stato compiuto tanto (1).

(1) Una soluzione generale ai problemi legati al movimento dei corpi "nel sedicesimo e diciassettesimo secolo, produsse una nuova fisica e una rivoluzione scientifica che distrusse e rimpiazzò la fisica e cosmologia aristoteliche a lungo dominanti. Ma molto prima dell'emergere della nuova fisica, nel Medioevo vi furono manifestazioni non trascurabile di insoddisfazione e di prese di posizione critiche nei confronti delle teorie di Aristotele, e sia che tali critiche medievali siano viste come parte di una tradizione antiaristotelica continua che si estendeva dal 1300 circa fino al diciassettesimo secolo, sia che vengano considerate come radicalmente distinte dai principali assalti antiaristotelici iniziati con Galileo, la fisica medievale è di per sé degna di studio e costituisce un capitolo importante della storia della scienza". (da "Edward Grand, La scienza nel medioevo, Il Mulino, Bologna 1997", p.54)

Nel 1600 il processo di revisione dell' insegnamento aristotelico fu notevolmente accelerato. Un contributo decisivo venne dall'attività di Galileo Galilei. Forse Galileo ebbe a che fare con maestri non così critici ed aperti come quelli che abbiamo ricordato in anticipo; ma può valere anche l'ipotesi che le idee che Galileo si andava facendo degli ambienti universitari non fossero del tutto precise. Con le sue qualità letterarie e una buona dose di aggressività contribuì a creare la caricatura dell'aristotelico "ottuso e testardo difensore dell'immobilismo", personificata in Simplicio. Varie furono poi le vicende che contribuirono a dar credito a tale immagine, come varie e storicamente collocate sono quelle che hanno contribuito a fare di Galileo un personaggio da mito.

2. LA CADUTA DEI GRAVI IN ARISTOTELE

Ricordiamo in forma sintetica i punti caratteristici della visione di Aristotele sulla realtà fisica:

- esiste una distinzione fra terra e corpi celesti; quindi la fisica delle due realtà va affrontata con visioni diverse;
- la materia terrestre è formata da quattro elementi che hanno il loro luogo naturale in quattro sfere concentriche: terra, acqua, aria, fuoco;
- c'è distinzione tra moti celesti (circolari) e moti terrestri o sublunari;
- il moto di un corpo terrestre è naturale se il corpo tende verso la sua sfera, diversamente è violento;
- la possibilità di un moto eterno è solo per i moti circolari celesti;
- per ogni movimento rettilineo si dà un punto di partenza e un punto di arrivo;
- per mantenere in moto un corpo (sublunare) con una certa velocità è sempre necessaria l'applicazione di una forza;
- c'è una proporzionalità diretta tra forza (intesa come motore) e velocità (almeno per corpi non troppo pesanti e forze non troppo piccole);
- la resistenza del mezzo non è considerata come una forza, ma come un fattore che entra nella proporzione;
la forza motrice è inversamente proporzionale alla resistenza;
- il motore è sempre applicato al corpo mosso; non è ammessa l'azione a distanza ;
- il vuoto non esiste e non può essere fatto.

Nella Fisica di Aristotele si afferma che il movimento locale, come ogni altro tipo di mutamento, è un processo che traduce in atto ciò che è "in potenza". Tale processo richiede necessariamente il continuo operare di una causa: quando la causa non opera più, viene meno anche l'effetto. Tutti i corpi in moto hanno perciò bisogno per muoversi o di un principio "naturale" intrinseco, la "natura" o "forma," responsabile del moto naturale del corpo, o di un motore esterno distinto dal corpo, il cui moto dura finché non sopravviene la separazione dal motore.

Inoltre l'effetto è proporzionale alla causa, per cui la velocità di un corpo in movimento varia in proporzione diretta alla forza o "virtù" della "natura" intrinseca o del motore esterno.

Se corpi viaggiano in mezzi diversi l'effetto risulta in proporzione inversa alla resistenza del mezzo. Il movimento e la velocità sono perciò determinati da due forze: una, interna o esterna, che spinge il corpo, e l'altra, esterna, che oppone resistenza.

Aristotele non possiede il concetto di massa, una capacità di resistenza intrinseca allo stesso corpo mobile, concetto che diventa il fondamento della meccanica del Seicento.

Per quanto riguarda i corpi in caduta libera, la forza o la potenza che causa è il peso, inteso come una proprietà interna al corpo stesso. Aristotele basa la propria teoria della caduta dei gravi sull'idea che tutti i corpi siano composti di quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco. I corpi costituiti prevalentemente di terra e acqua tendono a raggiungere il loro "luogo naturale", la terra; per questo, quando non sono ostacolati, cadono a terra. I corpi costituiti di aria tendono a salire verso il loro luogo naturale, il cielo.

Secondo Aristotele, un sasso cade perché è costituito prevalentemente di terra e quindi tende con forza al proprio luogo naturale. Una piuma, invece, è fatta in gran parte d'aria e quindi "aspira" alla terra con meno forza; perciò essa cade più lentamente di un sasso. Il peso, inteso come causa del moto di caduta, esprime quindi la proprietà che ha il corpo "grave" di tendere al suo luogo naturale. La velocità di caduta in ogni mezzo, essendo proporzionale alla causa del moto, risulta proporzionale al peso.

Inoltre, se un corpo si muovesse in un mezzo che non offrisse alcuna resistenza, la sua velocità sarebbe infinita. Poiché questa conclusione comporta un'impossibilità, Aristotele la considera un ulteriore argomento contro l'esistenza del vuoto.

Aristotele osserva che la velocità aumenta durante la caduta e spiega ciò ammettendo un aumento di attrazione man mano che i corpi si avvicinano al loro "luogo naturale", la Terra. Ciò ha condotto e supporre che la velocità aumenta in proporzione dello spazio percorso.

Parlando invece il moto di un proiettile (non naturale, ma violento) Aristotele si domanda come esso possa mantenersi per un certo tempo anche se vien meno l'azione di una forza motrice. Egli ricorre allo stratagemma dell'impossibilità del vuoto ed attribuisce al vortice d'aria la responsabilità della spinta.

Una contraddizione appare subito evidente nel pensiero di Aristotele. Come fanno a conciliarsi le due posizioni secondo cui da una parte il moto di un proiettile è mantenuto dal mezzo, e dall'altra la velocità di un grave in caduta è inversamente proporzionale alla densità del mezzo stesso? Il mezzo è ora causa del moto, ora invece di impedimento al moto stesso.

In verità le concezioni di Aristotele sul moto non sono approfondite ed appaiono piuttosto deboli. Aristotele stesso si accontenta di giustificare quanto l'osservazione dei fenomeni comuni presenta senza costruire impalcature teoriche o generalizzare il problema o cercare le sottigliezze. Critiche ed osservazioni non mancarono già fin dall'inizio. Particolarmente attenti alle possibili contraddizioni sono gli studiosi della scuola alessandrina.

Aristotele, nelle sue opere, mostra una certa attenzione ai fatti sperimentali, anche se con osservazioni prevalentemente di tipo qualitativo. Del resto le conseguenze previste sulla caduta dei gravi derivate dalle ipotesi formulate, non potevano essere verificate sperimentalmente in assenza di strumenti e metodi adatti.

Non sempre i seguaci furono coerenti con l'atteggiamento del maestro. Lo stesso Galileo muove loro l'esplicita accusa di non seguirne la metodologia nello studio dei fenomeni naturali.

Fu l'esigenza di uno studio più accurato, accompagnato da misure e verifiche, sulla caduta dei gravi, del moto dei proiettili e del moto dei pianeti a mettere in crisi le posizioni aristoteliche.

In sintesi possiamo dire che la Fisica di Aristotele risultava da una particolare visione dell'universo ed era poggiata su una metodologia che poneva massima fiducia nella razionalità a preferenza della analisi sperimentale quantitativa, pur senza rifiutare una coerenza con la realtà osservata.

Quando, nel XIII secolo, la meccanica di Aristotele fu reintrodotta, non senza difficoltà e resistenze nell'Occidente cristiano, dopo essere già stata oggetto di studio nel mondo islamico, fu sottoposta, come tutte le altre sue idee scientifiche, a una verifica logica ed empirica. Fu questa attività critica che condusse nei secoli successivi ad un approfondimento delle questioni e, anche se in forma non organica e determinata, ad una riformulazione gradualmente sempre più corretta delle questioni riguardanti il moto.

2. LO SVILUPPO DELLE IDEE NEL TARDO MEDIOEVO E L'ABBANDONO DELLE POSIZIONI DI ARISTOTELE

Qualche cenno originale rispetto alle posizioni di Aristotele si ha in Ipparco (II sec. AC), con la rimozione della necessità di una forza applicata in continuazione per mantenere il moto di un corpo. Filopono (V-VI sec. DC) considera la velocità dei corpi proporzionale alla differenza fra la forza motrice applicata e la resistenza opposta dal mezzo attraversato; parla inoltre di corpi che cadono nell'aria con piccole differenze di velocità e suggerisce una esperienza simile a quella attribuita a Galileo della caduta di due corpi di diversa natura da una torre.

Gli studi più significativi si hanno dal sec. XII in poi, con l'introduzione delle opere di Aristotele nelle università e in particolare con i commenti critici alla Fisica di Aristotele.

Giovanni Buridano (1300 – 1358), dottore a Parigi e rettore della Sorbona, approfondisce e insegna la dottrina dell'impetus, già suggerita da Filopono e riproposta anche dai commentatori Arabi (Avicenna e successori). Esso è inteso come una "qualità" acquistata dal corpo e da questo conservata, che gli consente di procedere su una data direzione; tende a "consumarsi" con l'intervento di agenti esterni.

Buridano espone le sue argomentazioni anche con una ricchezza di argomenti sperimentali di tipo qualitativo, nuova rispetto ai suoi predecessori. Questa attenzione all'esperienza, con l'esigenza del superamento di pregiudizi di natura storica e teorica, resta costante fino ai tempi di Galileo negli insegnamenti universitari. E', ad esempio, una preoccupazione di Francesco Bonamico, che insegna Pisa quando Galileo è studente.

Eliminata la necessità di una forza agente in continuo, che Aristotele attribuiva all'intervento dell'aria, tolto di mezzo la tendenza dei corpi verso il loro "luogo naturale", resta la necessità di spiegare il crescere della velocità nella caduta dei gravi. Le ipotesi in proposito si moltiplicano da parte degli studiosi, con scarsità di argomentazioni a favore, ma sempre con abbondanza di critiche da opporre alle proposte degli avversari (2). Buridano esprime la suggestiva idea di una gravità che di continuo aggiunge la propria azione all'impetus già acquisito dal corpo cadente; la questione si avvia così su un sentiero più sicuro.

Nicola di Oresme (1323 - 1382), docente nel Collegio di Navarra a Parigi e accompagnato da una felice carriera ecclesiastica, si applica allo studio degli Elementi di Euclide, alla traduzione dei testi di Aristotele e al commento di una parte di essi. Notevole è l'opera scritta in francese nel 1377 "Livre du ciel e du monde", a commento del trattato di Aristotele "De caelo"; in essa tra l'altro affronta l'opportunità di pensare al moto della terra per spiegare "le apparenze", elencando una serie di argomenti a favore.

A lui, oltre che a Giovanni Casali e ai Maestri di Oxford dobbiamo attribuire il merito di aver introdotto nello studio dei fenomeni l'uso delle coordinate cosiddette "cartesiane". Le proprietà considerate venivano rappresentate nella loro "intensio" ed "extensio" sui due assi detti "longitudo" e "latitudo". Nicola di Oresme tratta la questione nel libro "De configuratione qualitatum", dove sono presenti precise dimostrazioni geometriche.

In Oresme e negli altri studiosi del gruppo citato troviamo presenti i concetti tipicamente cinematici di velocità e di accelerazione, intesi come qualità di natura matematica, quindi trattabili in forma astratta, indipendentemente dalle considerazioni sperimentali. Essi inoltre formulano l'ipotesi del moto uniformemente accelerato e giungono, usando appunto il metodo grafico e ricorrendo alla "velocità di mezzo", a definirne esattamente la "legge oraria."

Ma si resta nel campo della cinematica pura; non si pretende di applicare le leggi costruite ai corpi pesanti che cadono. Prende posizione un modo particolare di fare attività scientifica, costituita da ragionamenti fatti semplicemente su delle “ipotesi” o casi astratti, le “hypothesis” che gli studiosi di fisica del secolo XVI intendono accantonare o tenere da parte, in attesa di far esprimere la realtà stessa, indagata, esplorata e provocata dalla sperimentazione (2).

Seguace delle teorie di Buridano è **Alberto di Sassonia** (muore nel 1390), autore di varie opere in cui parla anche del movimento di masse terrestri. Entrando a parlare del moto di caduta dei gravi nello scritto “Quaestiones subtilissimae”, si pone il problema sulle modalità dell’aumento della velocità durante la caduta. Trascura l’ipotesi che essa aumenti in proporzione del tempo, come era previsto nel modello cinematico di Nicola di Oresme e appoggia l’altra ipotesi che la velocità sia invece proporzionale allo spazio percorso. Anche gli scritti di Alberto ebbero grande diffusione fino alla prima metà del 1500.

Il primo studioso che colse accolse la connessione fra le leggi del moto uniformemente accelerato è **Domenico Soto** (1494 – 1570), frate domenicano e insegnante di teologia a Salamanca, autore di un’opera intitolata “Super octo libri Phisicorum Aristotelis quaestiones”. Parlando del movimento accelerato osserva: “Il moto uniformemente difforme è proprio dei corpi che si muovono di moto naturale”, come nel caso di “una massa che cade da una certa altezza”. La sua è pura supposizione, non convalidata da misurazioni e da prove. Ma l’accostamento della legge di Nicola di Oresme al moto di caduta porta a considerare gli aumenti della velocità proporzionali ai tempi trascorsi.

Grande importanza ha l’attività di studio di **Giovanni Battista Benedetti** (1530-1590), matematico del duca di Savoia, ammiratore della scuola “parigina”, esaminatore critico delle teorie aristoteliche, copernicano e precursore di Galileo.

Egli innanzitutto ha il merito di precisare con chiarezza la teoria di Buridano, dicendo che quando un corpo si muove di moto naturale, la sua velocità aumenta continuamente; questo avviene “perché l’*impetus* e l’*impressio* in esso crescono sempre, essendo costantemente uniti alla virtù movente”. Il grave cadente, insomma, è paragonato ad un corpo mobile soggetto all’azione di impulsi successivi, che gli imprimono sempre nuovi impeti i quali si sommano ai precedenti, e vanno continuamente accrescendoli, prima che essi siano estinti.

Ma il tratto suo più originale si rivela nell’opera “De mechanicis”, quando afferma che corpi di peso qualsiasi (purché di uguale sostanza !) cadrebbero tutti nel vuoto con uguale velocità: “*In vacuo corpora eiusdem materiae aequali velocitate moventur*”. Al poeta Lucrezio (I sec. AC) era balenata una intuizione del genere ed era anzi estesa a tutti i corpi.

Al Benedetti è attribuita la riflessione che poi Galileo farà sua sulla caduta simultanea di più corpi. Immagina un gruppo di corpi della stessa sostanza e dello stesso peso che cadono l’uno accanto all’altro, prima uniti insieme e poi separati, e conclude che il fatto di essere collegati non può modificarne la velocità. Un corpo avente le dimensioni di tutto il corpo unito cadrebbe quindi con la stessa velocità di ciascun suo componente. Perciò conclude che tutti i corpi della stessa sostanza o “natura”, quali che siano le loro dimensioni, cadrebbero con la stessa velocità. Commette l’errore di credere che le velocità di corpi dello stesso volume, ma di sostanze diverse sarebbero proporzionali ai loro pesi.

Le considerazioni dei personaggi presentati conducono all’abbandono deciso delle vedute di Aristotele e nello stesso tempo fanno emergere l’esigenza di una precisa verifica sperimentale per chiarire gli ultimi dubbi.

(2) E’ di Newton la frase “hipotesys non fingo”; essa esprime l’intenzione, espressamente dichiarata anche da Galileo, di riuscire con la ricerca scientifica a descrivere in termini matematici ciò che è veramente presente nella realtà.

Nel periodo immediatamente precedente a Galileo, spicca la figura di **Stevino di Bruges** (1548-1620), uno dei maggiori fisici e matematici del tempo, degno di rappresentare la non modesta schiera di studiosi, che occupano quello spazio che una presentazione un po' mitica della figura di Galileo a volte ha considerato deserto.

Stevino è soprattutto impegnato nello studio della statica dei corpi, dell'equilibrio sul piano inclinato e della statica dei liquidi. Sua è la regola del parallelogramma per la composizione delle forze. Si sa che realizzò l'esperimento della caduta di due palle di piombo di diverso peso, da una altezza di circa dieci metri su una tavola di legno. Trova che i due corpi cadono nello stesso istante ed afferma che lo stesso vale per corpi di eguale dimensione ma di peso diverso, e cioè di materiale diverso.

Egli non è interessato a sviluppare le conseguenze dinamiche delle sue osservazioni e neppure raffina le sue osservazioni sperimentali prendendo in considerazione l'effetto prodotto dalla resistenza dell'aria.

4. GALILEO E LE IDEE GIOVANILI SUL MOTO LIBERO DEI GRAVI

Le idee sulla caduta dei gravi in Galileo subiscono una evoluzione progressiva. Quasi si può dire che Galileo abbia ripercorso nella sua carriera di studi tutte le vicende presentate nei punti precedenti. Inizialmente non si distacca dall'idea aristotelica della "natura" intrinseca ai corpi e dall'idea della tendenza dei gravi a raggiungere il loro luogo naturale. Anche nelle opere scritte in età avanzata non mancano espressioni che sembrano ancora richiamare tale visione aristotelica. Forse questa concezione di fondo gli ha impedito di arrivare alla chiara formulazione del concetto di massa quale elemento intrinseco ai corpi che regola il rapporto fra la forza motrice e l'effetto prodotto.

Di Aristotele Galileo mantiene la sua sostanziale intenzione di descrivere fatti reali, senza perdersi in questioni ipotetiche; anche se poi procede con determinazione e in forma autonoma verso una generalizzazione dei risultati ricavati dalla osservazione della realtà, dando una decisiva autorevolezza al ragionamento induttivo e passando dai fatti sperimentali a situazioni ideali. .

Si può dire che Galileo, per quanto riguarda lo scopo della ricerca scientifica, conserva l'atteggiamento "aristotelico" proprio di chi intende scoprire e descrivere leggi sul comportamento dei corpi reali; questo è infatti l'obiettivo dello studio della fisica, che sarà ribadito successivamente anche da Newton. Ma nello stesso tempo non si ferma alle limitazioni del troppo stretto empirismo baconiano.

Galileo ha un profondo interesse per i problemi pratici, ma pensa che possano e debbano essere risolti in molti casi dalla fisica e dalla esatta misurazione, la quale rende possibile le applicazioni della geometria e del calcolo. Egli è un cultore delle opere di Archimede e studioso seguace delle idee e degli studi di Tartaglia, che intendeva la matematica anche come un utile strumento da usare nelle questioni pratiche.

Fu questa fusione di atteggiamenti che produsse in Galileo la figura dello scienziato "nuovo", in grado di avviare la ricerca scientifica su strade più ardue e di attribuire ai risultati della ricerca la qualità della sicurezza.

Nei primi anni del suo insegnamento accoglie e sostiene le idee di Buridano sull'impetus, anche se si manifesta piuttosto libero nel dare interpretazioni e fare applicazioni, come appare nello scritto "Le meccaniche", che il Viviani attesta essere già composto nel 1593. Tale scritto circolava in forma privata e fu pubblicato da Marino Marsenne a Parigi nel 1634. In esso Galileo presenta anche con chiarezza il centro di gravità dei corpi, argomento già affrontato da Giordano Nemorario (sec XIII) nei suoi precisi studi di statica. Associa le osservazioni sulla caduta libera dei corpi a quella dei corpi su piani inclinati o dei corpi che cadono lungo archi di circonferenza perché legati all'estremità di una corda fissata ad una sua estremità

Nel “De motu”, dialogo scritto a Pisa attorno al 1590, Galileo discute e confuta le idee di Aristotele sulla caduta dei gravi. Intende ammettere la possibilità di movimento anche nel vuoto; ma esprime l’opinione, strana e differente da quelle di altri predecessori critici di Aristotele, che una forza finita produrrebbe una velocità finita anche in assenza di una resistenza interna. Questa velocità finita era determinata in definitiva dalla “natura” intrinseca o gravità specifica. Galileo non accoglie (o non conosce) l’idea di moto accelerato proposta da Oresme ed è ben lontano dall’affrontare la questione da un punto di vista esclusivamente cinematico.

Esprime le idee che furono già del Benedetti sulla uguaglianza di velocità di caduta di due corpi della stessa natura, aventi pesi diversi. Ma mantiene ancora l’opinione che la cosa non si può dire per corpi di materie diverse, come un pezzo di piombo e un pezzo di legno: essi cadono con le velocità proprie delle loro “nature” e scrive che “se li si fa cadere dall’alto di una torre, il piombo precede di un bel tratto il legno; io ne ho fatto più volte la prova...Oh com’è facile ricavare dimostrazioni vere da principi veri!” (3).

Di altri esperimenti sulla caduta dei corpi da una torre parla il Viviani nella biografia di Galileo, ma c’è motivo di pensare che tali esperimenti fossero solo presenti nelle discussioni o nelle ipotesi dello studioso o che si colleghino ad episodi riferiti; è dubbio che siano stati fatti realmente dallo stesso Galileo.

Si ha documentazione della sua accoglienza di un orientamento più chiaramente cinematica e matematico nella lettera a Paolo Sarpi del 1604. In essa egli dichiara di aver dimostrato che gli spazi percorsi da un corpo in caduta libera sono tra loro nello stesso rapporto dei quadrati dei tempi, accettando implicitamente la presenza di una accelerazione che tende a fare aumentare la velocità fino all’infinito; questa è la conclusione raggiunta dai maestri di Oxford. Ma nella stessa lettera troviamo l’affermazione, evidentemente erronea, che deduce il suo teorema dall’assioma che la velocità istantanea è proporzionale alla “distanza” percorsa. Galileo ignora o respinge la correzione introdotta da Domenico Soto, che dichiarava la velocità istantanea proporzionale al tempo. Scrive il Crombie “Pare probabile che Galileo scoprisse il proprio errore e formulasse correttamente la legge dell’accelerazione e il teorema dello spazio già nel 1609, anche se li pubblicò solo nei *Discorsi sui massimi sistemi* nel 1632” (4).

E’ opportuno dire che nelle opere di Galileo, come in quelle degli altri studiosi predecessori e contemporanei le leggi non sono espresse con notazione algebrica, ma con formulazioni di carattere descrittivo, che mettono in chiaro le relazioni di proporzionalità.

Si sa anche che sviste ed errori sono presenti in Galileo, a volte dovuti ad una certa fretta nel concludere l’argomento o a soverchia foga polemica e, a volte, ad una eccessiva fiducia nella intuizione che, stranamente, è ancora usata come sostitutiva di una coerente e sana sperimentazione.

Per quanto riguarda l’uso del piano inclinato nello studio del modo dei gravi è possibile che gli esperimenti risalgano ai primi anni del 1600. Galileo è del parere che la caduta in verticale sia un caso limite della caduta lungo il piano obliquo, al tendere dell’angolo di inclinazione a 90 gradi. La relazione matematica fra spazi percorsi e tempi impiegati deve essere la stessa, a parte i diversi valori della accelerazione. L’uso del piano inclinato permette di “ritardare” il moto e di misurare i tempi con maggiore precisione. A tal fine Galileo usa il meccanismo dell’orologio “ad acqua”; giunge indirettamente alla misura dei tempi pesando le diverse quantità di acqua fuoriuscite dall’orifizio di un recipiente. E’ un accorgimento già suggerito da Nicola Cusano (1401 – 1464). (5). Degli esperimenti realmente fatti da Galileo non si hanno relazioni precise né misure effettivamente rilevate.

(3) Cfr. A.C. Crombie, *Da s. Agostino a Galileo*, Feltrinelli, 1982, pag. 340.

(4) Ivi, pag. 341.

(5) Cfr Umberto Forti, *Storia della scienza*, Dall’Oglio, 1968, vol. 2, pag.301.

5. LE POSIZIONI DI GALILEO NEI “DISCORSI”

Galileo, dopo il processo sostenuto per aver divulgato le teorie copernicane, già avanzato in età, libero dall'insegnamento, nella quiete della sua casa di Arcetri, con l'aiuto dell'assistente Vincenzo Viviani, stipendiato dal Granduca di Toscana stimolato dagli amici, raccoglie tutti i suoi appunti e le sue riflessioni migliori sulla meccanica ed in particolare sul moto dei corpi e pubblica nel 1638 il libro dal titolo “Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali”.

Galileo finalmente mette in atto le sue intenzioni di dare una organica sistemazione alle conoscenze meccaniche, lasciando un'opera che potrebbe essere considerata la prima opera classica della scienza nuova, che ormai, dopo un lungo periodo di maturazione, sta emergendo e si sta configurando.

Il libro è strutturato in quattro parti, dette “giornate”, con riferimento allo svolgimento del dialogo fra gli interlocutori: Salviati, Sagredo e Simplicio.

Anche se la prima giornata è dedicata a questioni riguardanti la resistenza dei corpi solidi, in essa trova spazio una ampia trattazione sulla resistenza che il mezzo fluido oppone alla caduta libera dei corpi. La terza giornata è dedicata specificamente ai movimenti locali, al moto uniforme e al moto naturalmente accelerato.

Galileo approfitta passare in rassegna le questioni affrontate durante gli studi fatti negli anni precedenti. Sono segnalate le diverse opinioni attribuite genericamente a presunti sostenitori di idee vecchie e le posizioni definitive alle quali Galileo, assieme ai ricercatori contemporanei o precedenti sono giunti.

Evitando di perderci in alcune pagine di dialogo prolisso e attinente a questioni minuziose, tentiamo un elenco riassuntivo delle questioni affrontate.

- a) E' rifiutata esplicitamente la necessità di una causa continua presente nel moto
- b) E' eliminato il ricorso alla questione del vuoto per giustificare il movimento.
- c) La velocità di caduta è indipendente dal peso dei corpi.

“Sagredo: Ma io signor Simplicio che n'ho fatto la prova, vi assicuro che una palla di 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”

Galileo riprende l'argomento dei due corpi lasciati cadere prima separati e poi legati fra loro.

“Salviati: Ma se questo è, ed è insieme vero che una pietra grande si muova, per esempio, con otto gradi di velocità, ed una minore con quattro, adunque, congiungendole amendue insieme, il composto di loro si muoverà con velocità minore di otto gradi: ma le due pietre, congiunte insieme, fanno una pietra maggiore che quella prima, che si muoveva con otto gradi di velocità: adunque questa maggiore si muove men velocemente che la minore; che è contro 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. ”

- d) La velocità di caduta è indipendente dalla “natura” dei corpi. Tutti i corpi, di qualunque materia, dovrebbero cadere con la stessa velocità
- e) La teoria precedente si applica bene ai corpi in caduta libera nel vuoto. La osservazione della realtà mette in evidenza una leggera differenza nei tempi di caduta in un mezzo resistente.

La differenza reale delle velocità è tuttavia ben diversa da quella prevista dalle supposizioni di Aristotele. In un mezzo resistente qual è l'aria, un corpo leggero sarebbe stato frenato più di uno pesante.

Galileo, nella prima giornata del dialogo, si sofferma lungamente a descrivere il diverso comportamento dei corpi di diverso peso nel loro movimento nell'aria. Riferisce di esperimenti fatti con un corpo di piombo ed uno di sughero messi in oscillazione appesi all'estremità di corde uguali. E' adombrata la supposizione che l'attrito dell'aria produca diversi effetti su corpi di diverso peso, ossia che l'effetto sia dovuto a qualcosa che è nei corpi stessi. Ma è ancora troppo vicino il freno creato dall'idea delle diversità delle "nature" per introdurre decisamente il concetto di massa inerziale.

- f) Il moto uniforme si ha quando gli spazi percorsi da un mobile in tempi uguali, comunque presi, risultano tra loro uguali.

Il tema è trattato nella terza giornata dei Discorsi. Qui Galileo usa decisamente un linguaggio cinematica; descrive le relazioni fra le grandezze variabili mediante affermazioni schiettamente matematiche.

- g) Il moto di caduta dei gravi è un moto naturalmente accelerato. In esso "l'intensità della velocità cresce secondo l'estensione del tempo".

Galileo esprime qui ufficialmente la sua posizione, già maturata da tempo, anche se restava il ricordo dell'errore sfuggito in uno scritto giovanile.

- h) "Se un mobile scende, a partire dalla quiete, con moto uniformemente accelerato, gli spazi percorsi da esso in tempi qualsiasi stanno fra loro in duplicata proporzione dei tempi, cioè stanno tra di loro come i quadrati dei tempi"

Galileo ripete la dimostrazione fatta dai Nicola di Oresme con l'utilizzo della velocità di mezzo. "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"

- i) Il moto su un piano inclinato è naturalmente accelerato, come il moto di caduta libera.

Galileo accerta di aver fatto ripetute esperienze con il piano inclinato. Ricava che i tempi impiegati a scendere su piani diversamente inclinati, aventi la stessa altezza, stanno fra loro come le rispettive lunghezze. Afferma inoltre che le velocità raggiunte da un corpo che cade lungo la verticale e quella raggiunta da un corpo che scende sul piano inclinato sono uguali.

Galileo si perde nel raccontare minuziosamente gli accorgimenti usati nell'uso del piano inclinato per l'eliminazione dell'attrito; insiste nel dire che "per esperienze ben cento volte replicate sempre s'incontrava, gli spazi 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"

I commentatori decisi ad esaltare lo scienziato pisano trovano qui la documentazione del "profondo convincimento di Galilei, che riconobbe sempre l'importanza decisiva della tecnica e dell'esperienza per il progresso del sapere" (6).

(6) Cfr. "Opere di Galileo Galilei, a cura di Franz Brunetti, vol. secondo, Unione tipografico-editrice torinese, 1980, pag. 745.

Lo studioso Marino Mersenne (1588 – 1648), appassionato di fisica sperimentale, attento a tutte le innovazioni di Galileo, ma nello stesso tempo molto preciso e pronto nel rilevarne le ambiguità, ripete gli esperimenti, ma non riesce a ottenere gli stessi risultati. Denuncia la cosa a Galileo in una lettera, esprimendo anche dubbi su alcuni accorgimenti circa la sua esecuzione e in particolare su quelli che si riferiscono alla limitazione degli effetti dovuti all'attrito. Anche Alexandre Koyré, uno dei più grandi storici della scienza, sostiene l'ipotesi che quello del piano inclinato sia uno degli esperimenti "pensati" o soltanto progettati, ma non eseguiti.

L'esposizione delle questioni nella terza giornata dei Discorsi è condotto con rigore matematico; l'impegno dell'autore è rivolto alla chiarificazione delle leggi che presiedono il moto e alla definizione di casi particolari esaminati in un numero talvolta eccessivo. Questa attenzione si può collegare al costante interesse di Galileo verso la soluzione dei problemi pratici di ingegneria e di tecnica e quindi all'intenzione di fornire soluzioni pronte all'uso per coloro che devono trattare questioni simili.

6. CONCLUSIONE: LA POSIZIONE DI GALILEO NELLO SVILUPPO DELLA RICERCA SCIENTIFICA

Alla conclusione della rassegna fatta ci si pone la domanda sulla consistenza del contributo dato da Galileo allo studio del problema della caduta dei gravi.

E' chiaro il superamento della posizione di Aristotele e dei suoi ottusi sostenitori. Ma resta il dubbio sulla effettiva dimensione della schiera di tali personaggi e della loro effettiva presenza e influenza nelle sedi universitarie. Il Semplice, che personifica lo stereotipato, goffo e ostinato difensore di tesi lontane dalle realtà, dopotutto è una invenzione di Galileo.

Lo studioso Edward Grandt, già nel saggio "La scienza nel Medioevo" così si esprime: "Galileo è stato anticipato dai suoi predecessori medioevali in alcuni dei più importanti concetti e teoremi riguardanti il moto. Non può più essere messo in dubbio che il merito dei suoi contributi alla cinematica, un tempo ritenuti assolutamente originali, è stato enormemente esagerato, principalmente perché le valutazioni tradizionali dei suoi risultati, formulate tra il diciassettesimo e il diciannovesimo secolo, furono in gran parte espresse nella quasi totale ignoranza dei risultati delle scienze medioevali. Accurate e minuziose ricerche nel corso del ventesimo secolo hanno non solo scoperto le realizzazioni medievali fino ad allora sconosciute, ma ne hanno anche tenuto conto per una riconsiderazione della parte di Galileo nella storia della scienza. In conseguenza di ciò si è posta una nuova questione. Se i maggiori teoremi e corollari, precedentemente attribuiti a Galileo, erano già stati enunciati nel Medioevo, in che senso si può dire, sempre che si possa, che Galileo abbia fondato la moderna scienza della meccanica?" (7).

Lo stesso autore prosegue sottolineando il merito di Galileo di aver con determinazione raccolto e ordinato le sparse intuizioni e affermazioni precedenti in un sistema almeno più organico. Inoltre Galileo attribuì a conclusioni e teoremi, ricavati come utile esercizio di pura speculazione, la capacità di descrivere effettivamente i fatti reali o almeno una loro idealizzazione.

Le grandezze cinematiche come la velocità e l'accelerazione risultano definite con correttezza .

In definitiva Galileo selezionò le intuizioni, dando peso a quelle collegate ad una certa dimostrazione, mise insieme i concetti e le definizioni, i teoremi, le leggi e i corollari e li organizzò in un complesso logico ed ordinato che applicò senza equivoci all'effettivo moto dei corpi reali. E' innegabile che il suo lavoro fu una valida premessa al proseguimento degli studi sul moto compiuto poi da Newton.

(7) Da Edward Grandt, *La scienza nel medioevo*, Il mulino, 1997, pag. 80.

Vedi anche E. Grandt, *Le origini medioevali della scienza moderna*, Einaudi, 2001, pag. 253:

"Nel secolo XX fu compiuto un eroico sforzo per rivedere questo giudizio negativo sulla scienza e la filosofia naturale del Medioevo, ma con scarso esito. Il parere degli odierni uomini di cultura è probabilmente non molto diverso da quello di Galileo... E' opinione diffusa che la nuova scienza trionfò nonostante gli ostacoli a essa frapposti dagli aristotelici reazionari. Ma questa interpretazione è fuorviante, perché deprecabilmente incompleta" (ivi, pag. 253).

Tra gli studiosi eroici ricordiamo Pierre Dhuem, che con profonde e nuove ricerche e numerose pubblicazioni immise il tardo Medioevo nella corrente generale dello sviluppo scientifico.

Cosa non è riuscito a fare Galileo? Non è giunto alla formulazione dinamica enunciata da Newton. Non ha maturato il concetto preciso di massa inerziale, pur avendo chiaro il principio di inerzia, che dà sostegno alla possibilità del moto anche in assenza di forze agenti; anche se, nella spiegazione della diversità nel tempo di caduta dei corpi di diverso peso in un mezzo resistente la spiegazione più logica che si affacciava era l'esistenza di un diverso comportamento dei due corpi di fronte alla stessa resistenza.. Tanto già si era fatto nel passare dalle considerazioni sulla "natura" dei corpi intesa come richiamo esterno all'attenzione al peso, inteso come proprietà intrinseca. Mancava anche una visione corretta della natura del peso che sarà in seguito considerato come forza esterna agente sulla massa del corpo.

Date queste considerazioni e la situazione vera delle vicende storiche il Crombie esprime la seguente considerazione: "Da lungo tempo non è più possibile considerare l'esperimento della torre pendente, ammesso che Galileo lo facesse davvero, come un esperimento cruciale o anche nuovo" (8).

Restano ancora nella divulgazione scientifica i residui delle esaltazioni fuorvianti e poco fondate che hanno fatto di Galileo un mito nella storia della scienza e hanno condotto a pensare che "tutto incominciò con lui" .

E' strano che ancora oggi, con l'intento di esaltare i meriti di Galileo, gli si attribuiscono affermazioni e imprese che, oltre a non essere in accordo con la realtà storica, rischiano di attribuire allo scienziato delle concezioni erronee.

Ma anche questa situazione può essere considerata un esempio che descrive la difficoltà che incontrano alcune idee o convinzioni a scomparire dal bagaglio culturale delle persone, quando sono utilizzate a sostegno di posizioni preconcepite o di comodo.

Evidentemente anche la storia della scienza ha bisogno di un metodo scientifico.

(8) Op. cit. ,pag. 341

BIBLIOGRAFIA

A.C. Crombie, *Da S. Agostino a Galileo*, Feltrinelli, Milano 1982

Opere di Galileo Galilei, a cura di Franz Brunetti, collana *Classici della scienza*, Utet, Torino, 1980

Edward Grandt, *La scienza nel medioevo*, Il Mulino, Bologna, 1997

Edward Grandt, *Le origini medievali della scienza moderna*, Einaudi, Torino, 2001

Marshall Clagett, *La scienza della meccanica nel Medioevo*, Feltrinelli, Milano, 1972

Umberto Forti, *Storia della scienza*, voll.2 e 3, Dall' Oglia, Milano, 1968