Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE
Corso di Laurea in Matematica

ALCUNI CENNI DI STORIA DELLA MECCANICA CLASSICA

Tesi di Laurea in Fisica Matematica

Relatore:
Chiar.mo Prof.
SANDRO GRAFFI

Presentata da:
ILARIA BIANCHI

II Sessione
Anno Accademico 2012 - 2013

A chi mi ama, ogni giorno.

Introduzione

Lo studio della meccanica classica e in particolare la discussione nata intorno ai principi newtoniani è stata al centro di numerosi dibattiti nel corso della storia; questi hanno dato luogo a diverse visoni e interpretazioni di ciò che Newton aveva provato a mostrare e dimostrare.
Poichè tale discussione è stata necessaria nel fondamento della scienza moderna pare doveroso ricordare, almeno in parte, le grandi menti che hanno permesso di costruire le basi per una nuova scienza.
Nell'immaginario popolare ci si figura sempre che il genio di Newton abbia partorito d'improvviso quelle brillanti idee che stanno alla base della meccanica, che abbia avuto un lampo di intuizione guardando una mela cadere da un albero.
In realtà egli stava riordinando e dando nuova voce a idee molto antiche e a leggi che molti prima di lui avevano provato a dimostrare.
Nel primo capitolo si parla dei maggiori scienziati che prima di Newton posero le basi per la meccanica classica, ovviamente questi non furono gli unici ma i loro nomi sono tra i più famosi nella storia della scienza: Da Vinci, Galilei e Huygens rappresentarono una svolta in ambito scientifico, padri di molteplici scoperte e menti totalmente al di fuori del comune. Essi posero le basi di ciò che Newton cercò di esplicare al meglio nei *Principia*.
Il secondo capitolo è totalmente dedicato alla figura di Newton e ai *Principia*: vengono analizzate le sue definizioni iniziali, le tre leggi della dinamica e vari argomenti strettamente correlati con queste, come le leggi del moto o il moto dei pianeti.
Dal momento in cui furono pubblicati, i *Principia* diventarono un libro cardine della meccanica classica, in seguito però furono numerosi gli scienziati che che si adoperarono al fine di discutere i principi dettati da Newton: il loro obiettivo fu quello di raggiungere una precisione sempre maggiore per questi stessi principi.
La discussione dei concetti newtoniani caratterizzò la seconda metà dell'Ottocento e la prima parte del secolo scorso, fino all'esposizione della teoria della relatività, la cui trattazione diventò l'argomento cardine del '900. Di

tutto ciò si tratta nel terzo capitolo, dove trova spazio anche un ricercatore più moderno: quando Russo pubblicò "La rivoluzione dimenticata" nel '96 il suo libro venne paragonato ad una scoperta archeologica. Egli retrodatò la nascita della scienza moderna di duemila anni, mostrando che scienziati come Euclide e Archimede non furono isolati precursori di una forma di pensiero che sarebbe fiorita solamente del XVII secolo, ma esponenti di spicco di una vasta schiera di avanzatissimi scienziati. Essi diedero luogo a una rivoluzione giunta a un livello tale da far apparire Galilei e Newton apprendisti un po' confusi, ma geniali, alle prime armi.

Indice

Capitolo 1

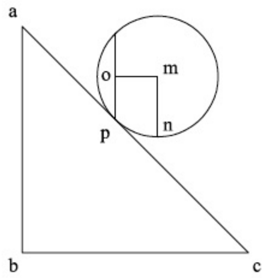
Le origini della meccanica classica

1.1 Leonardo da Vinci

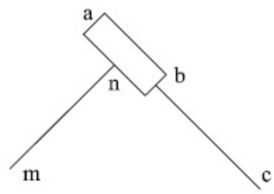
Da Vinci non fu certo il primo ad occuparsi della meccanica nei suoi vari aspetti, ma bisogna sottolineare che fu enorme la quantità di argomenti che egli trattò in tale campo: nessuno prima di lui aveva mai approfondito in modo così ampio vari aspetti della meccanica, e solamente pochi dopo di lui lo fecero.
Egli fu, ad esempio, il primo a considerare il problema del moto su un piano inclinato, problema che divenne uno dei punti focali del famoso *Due nuove scienze* di Galilei, circa un secolo dopo.
Affrontò quasi ogni tipo di problema, spesso con più fede che successo, inoltre ritornava di frequente su un problema già affrontato, percorrendo però cammini differenti, senza preoccuparsi di contraddire se stesso.
Il suo lavoro nella meccanica è pressochè unico, eccone quindi i tratti salienti.

Il moto di un corpo su un piano inclinato
Questo problema, che catturò l'interesse di Leonardo come molti prima e dopo di lui, evocò, da parte dello scienziato, alcune spiegazioni piuttosto originali.

Un corpo di forma sferica posto su un piano inclinato assume un moto che sarà tanto più rapido quanto più il punto di contatto con il piano si trova a maggiore distanza dalla perpendicolare per la retta passante per il centro del corpo.
Più la retta ab è piccola rispetto a ac, più la sfera scivolerà lentamente lungo

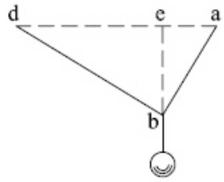


la linea ac: questo perchè se p è il polo della sfera, la parte m, alla quale p non appartiene, cade più rapidamente in assenza della piccola resistenza procurata dal contrappeso della parte o. Se questo contrappeso non è presente la sfera cadrà lungo la linea ac più rapidamente se o divide m con maggiore frequenza.
Quindi se p è il polo in cui la sfera tocca il piano, maggiore è la distanza tra il polo e n, maggiore sarà la velocità del moto della sfera.
Bisogna sottolineare che Leonardo, come gli aristotelici prima di lui, non aveva concepito l'idea di una distinzione tra statica e dinamica.
Inoltre è necessario riconoscergli il merito di aver tentato di risolvere il problema del piano inclinato utilizzando un altro metodo, che nessuno fino a quel momento aveva mai tentato. In questo modo egli osservò che un corpo uniforme costituito da un determinato peso, che cade obliquamente divide il suo peso in due differenti contributi: lungo la linea bc e lungo la linea mn.



Leonardo e la risultante di forze
Leonardo si chiese come il peso di un corpo, sostenuto da due corde sia distribuito tra queste due. Era dell'opinione che il peso di un corpo sospeso in b era diviso tra la stringe bd e ba come il rapporto tra le lunghezze di ea e de.

Questa ipotesi contraddice la classica regola del parallelogramma; tuttavia Leonardo utilizzò la seguente regola:
"Fissato un punto su una delle componenti della forza, il momento delle al-



tre componenti coincide con il momento della forza totale calcolata sul punto fissato[1]."
Utilizzando come intermediario il concetto di momento, arriva al concetto di risultante di più forze.

Leonardo e l'energia dei corpi in movimento
Riguardo tale argomento Leonardo riconcigliò differenti dottrine a lui precedenti utilizzando la seguente definizione di *impeto*.
"L'impeto è una virtù creata dal movimento e trasmessa dal motore dei corpi in movimento, è la traccia del moto che viene trasmesso dal motore del corpo in movimento[2]."
Egli avanzò anche l'ipotesi che il moto di un proiettile fosse diviso in tre fasi: nella prima il moto è pura violenza, il suo effetto è tale che il proiettile sembra non avere massa e sia soggetto solamente all'impeto iniziale. Nella terza fase l'impeto scompare completamente e il moto del proiettile è soggetto alla sola gravità. Esiste inoltre un periodo intermedio nel quale il modo è in parte violento e in parte naturale; questo è il periodo dell'impeto composto.

Procedendo in questi ambiti Leonardo diede una definizione di forza piuttosto lirica.

"La *forza* è una qualità spirituale, una potenza invisibile che, mediante un impeto esterno ed accidentale, è causata dal moto e introdotta all'interno del corpo, in modo che questo sia costretto a mutare il suo naturale comportamento.
La forza dà al corpo una vita propria, costringe qualsiasi tipo di oggetto a cambiare forma e posizione, a fiondarsi alla sua morte, a cambiare se stesso in accordo alle circostanze.
Essa nasce dalla violenza e muore nella libertà. Più è grande e più velocemente si consuma. Allontana qualsiasi cosa che si oppone ad essa, finchè non

[1] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.75
[2] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.76

viene essa stessa distrutta, cerca di sconfiggere e distruggere qualsiasi cosa che si opponga ad essa, e, una volta vittoriosa, muore.
Diventa più potente quando incontra ostacoli maggiori.
Nulla si muove senza *forza*. Inoltre un corpo sul quale essa agisce non si accresce e non varia il suo peso."
E ancora: "La *forza* è una potenza spirituale, incorporea, invisibile e viene creata in corpi che si trovano, a causa di una violenza accidentale, in uno stato differente da quello naturale. È spirituale perchè c'è in questa *forza* una vita immateriale attiva, e invisibile perchè corpi su cui essa agisce non cambiano in peso o forma. Ha una vita breve poichè cerca sempre di dominare la sua causa, e, una volta fatto ciò, muore. Infine una forza può generarne un'altra, e questa è la causa dell'impatto[3]."

Con questa definizione di forza Leonardo era ritornato alle idee della dottrina pitagorica, secondo la quale un corpo dotato di un certo peso, separato da una stella a cui esso appartiene, tende a ritornare ad essa, al fine di riottenere la completezza della stella. Inoltre sottolineava la differenza tra *forza* e *peso*, affermando che una si opponeva all'altra.
Il peso è indistruttibile. Quando un corpo pesante cade al suolo, questo esercita una pressione su di esso. Un peso incorpora una forza, un moto e un impatto allo stesso tempo, ma la caduta di un corpo è essa stessa preceduta da un'accidentale inclinazione, per essere precisi secondo Leonardo all'origine di ogni azione in meccanica deve esserci un motore primo.
In conclusione le precedenti tesi sembrano più essere caratterizzate da una maggiore poesia che precisione, da una maggiore eloquenza che solidità.

Leonardo e il moto perpetuo
Leonardo negava la possibilità di un moto perpetuo, sostenendo che la forza si consuma in maniera continua. Dall'altro lato però la gravità cerca di produrre una sorta di equilibrio: tutti i moti che nascono grazie alla gravià perpetuano nella loro ultima posizione.

Leonardo e la caduta dei corpi
Tra i vari problemi di cui si occupò fu inevitabile che Leonardo si addentrasse nel problema della caduta dei corpi. Dopo aver lungamente esitato su quale delle precedenti leggi della velocità di un moto, esposte da altri illustri scienziati prima di lui, fosse la più corretta, egli si dichiarò interamente favorevole con la legge $v = kt$.
Egli credeva quindi che il moto fosse proporzionale alla velocià e, di conse-

[3]R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.78 e 79

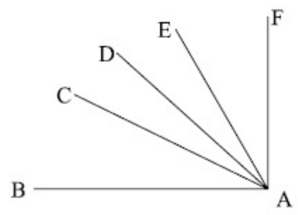
guenza, si stava sbagliando riguardo alla legge delle distanze.

1.2 Galileo Galilei

Galileo fu uno dei protagonisti del superamento della descrizione aristotelica della natura del moto.
Già nel medioevo alcuni autori, avevano osservato contraddizioni nelle leggi aristoteliche, ma fu Galileo a proporre una valida alternativa basata su osservazioni sperimentali. Diversamente da Aristotele, per il quale esistono due moti "naturali", cioè spontanei, dipendenti dalla sostanza dei corpi, uno diretto verso il basso, tipico dei corpi di terra e d'acqua, e uno verso l'alto, tipico dei corpi d'aria e di fuoco, per Galileo qualunque corpo tende a cadere verso il basso nella direzione del centro della Terra.
Se vi sono corpi che salgono verso l'alto è perché il mezzo nel quale si trovano, avendo una densità maggiore, li spinge in alto, secondo il noto principio già espresso da Archimede: la legge sulla caduta dei gravi di Galileo, prescindendo dal mezzo, è pertanto valida per tutti i corpi, qualunque sia la loro natura.
Per raggiungere questo risultato, uno dei primi problemi che Galileo e i suoi contemporanei dovettero risolvere fu quello di trovare gli strumenti adatti a descrivere quantitativamente il moto. Ricorrendo alla matematica, il problema era quello di capire come trattare eventi dinamici, come la caduta dei corpi, con figure geometriche o numeri che in quanto tali sono assolutamente statici e sono privi di alcun moto.
Bisognava dunque prima sviluppare gli strumenti della geometria e in particolare del calcolo differenziale, come fecero successivamente fra gli altri Newton, Leibniz e Cartesio. Galileo riuscì a risolvere il problema nello studio del moto dei corpi accelerati disegnando una linea ed associando ad ogni punto un tempo e un segmento ortogonale proporzionale alla velocità.
In questo modo costruì il prototipo del diagramma velocità-tempo e lo spazio percorso da un corpo è semplicemente uguale all'area della figura geometrica costruita.
Sulle base degli studi sul moto, di esperimenti mentali e delle osservazioni astronomiche, Galileo intuì che fosse possibile descrivere sia gli eventi che accadono sulla terra che quelli celesti con un unico insieme di leggi. Superò quindi in questo modo anche la divisione fra mondo sublunare e sovralunare[4] della tradizione aristotelica.

[4] governato da leggi diverse da quelle terrestri e da moti circolari in sfere perfette

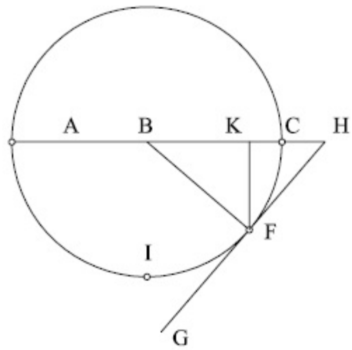
Galileo e la statica
Come già ricordato per Galileo il peso di un corpo rappresenta la sua "naturale inclinazione a portare se stesso verso il centro della Terra[5]", oltre a questa egli diede anche la definizione di *momento*, costituito dal peso del corpo e dalla sua distanza dal centro della bilancia sulla quale esso si trova, e sottolineò l'esistenza del *centro di gravità* di un corpo, come "peso principale di un corpo attraverso un centro in cui si uniscono la sua impetuosità e il suo peso". Con queste definizioni è possibile spiegare le conclusioni che Galileo trasse dallo studio del piano inclinato.



Supponiamo di considerare una sfera perfettamente rotonda posta su un piano perfettamente liscio.
Se la sfera fosse posta sul piano AB basterebbero il vento o una lieve forza a spostare la sfera dal punto dove essa è collocata. Se volessimo invece spostare verso l'altro una sfera che si trovi sul piano AC , AD, AE, avremmo bisogno di una forza sempre maggiore, finchè considerando il piano perpendicolare AF, sarà possibile spostare verticalmente la sfera verso l'alto con una forza di intensità pari al peso della sfera.
Galileo procedette considerando due oggetti di uguale peso, A e C, in equilibrio sulla leva ABC, fu in grado di dimostrare che: se il braccio BC cade fino a coincidere con BF, il momento del peso F diventa inferiore rispetto al momento di A, che vale $\frac{BK}{BF}$.

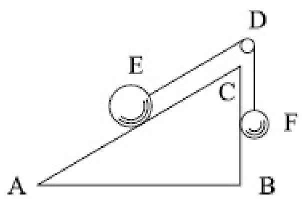
Dimostrazione. Quando il peso si trova in F, esso è parzialmente sostenuto dal piano circolare CI e la sua tendenza a muoversi verso il centro della Terra diminuisce in base all'entità con cui BC eccede BK.
Quindi il peso è sostenuto da questo piano nella misura in cui esso sarebbe sostenuto dalla tangente GFH.
In questo modo egli riduce l'effetto del peso F sul piano inclinato GFH all'effetto dello stesso peso appeso al braccio della leva BF, e conclude che il

[5]R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.129



rapporto tra il momento totale del corpo in movimento sulla perpendicolare all'orizzonte e il momento in cui si trova sul piano inclinato HF coincide con il rapporto tra FH e FK.
Cioè: $\dfrac{BF}{BK} = \dfrac{FH}{FK}$.

Galileo, inoltre, risolse il problema del piano inclinato appellandosi al concetto dei lavori virtuali.



Dimostrazione. Si consideri il triangolo ABC come in figura, sul piano AC è posizionato un corpo E legato alla corda EDF, nel punto F alla corda è legato un peso, o una forza, che è in relazione con il peso E nella misura del rapporto tra BC e CA.
Se il peso F comincia a cadere trascina con sè E lungo il piano inclinato, disegnando un cammino nella direzione di AC, uguale a quello tracciato dal corpo F in caduta.
Si osservi ora che nel lasso di tempo in cui questo avviene il corpo E non sarà separato dal suo centro di gravità da una distanza maggiore della lunghezza della verticale BC, mentre il peso F, cadendo verticalmente, cadrà a una distanza uguale all'intera linea AC.

Quindi è possibile affermare che il rapporto tra il cammino della forza F con quello della forza E è uguale al rapporto tra la lunghezza AC e la lunghezza CB, ed è quindi uguale al rapporto tra il peso E e il peso F.

Galileo e la caduta dei corpi

Grazie a una lettera scritta da Galileo a Paolo Sarpi, nell'ottobre del 1604, sappiamo che Galileo credeva correttamente nell'attuale legge delle distanze: $s = costante * t^2$.

"La distanza percorsa con un generico moto è proporzionale al quadrato del tempo di caduta. Di conseguenza le distanze percorse in tempi uguali sono in relazione l'una all'altra come i numeri dispari consecutivi a partire dall'unità[6]."

Tuttavia inizialmente Galileo associava questa legge con la legge non corretta delle velocità: $v = k * s$, quindi la legge delle distanze, corretta, venne da lui ricavata da deduzioni non corrette.

È importante citare a questo punto il famoso trattato galileiano: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e ai moti locali*, questo è la più importante opera galileiana sulla scienza moderna: illustra e dimostra i principi scientifici della fisica, della dinamica dei movimenti, e della scienza delle costruzioni.

Il trattato si sviluppa come un dialogo fra tre personaggi riguardante temi scientifici, essi rappresentano differenti punti di vista: il ricercatore innovatore e progressista, il dotto accademico ancorato alla tradizione ed il mediatore.

È necessario anche sottolineare che il principale riconoscimento delle scoperte di Galileo in Inghilterra fu dovuto ad Isaac Newton nei *Principia*: nel primo libro dell'opera, dopo aver espresso i tre fondamentali Principi della dinamica, Newton indicò che questi principi derivano dagli esperimenti e teorie di Galileo Galilei sul movimento di caduta dei gravi (verticale e sul piano inclinato) e sul movimento in due dimensioni (lancio del proiettile). Fu infatti durante lo studio del piano inclinato che Galileo ebbe l'intuizione del principio di inerzia e riuscì a determinare il valore dell'accelerazione di gravità. Inoltre Galileo affermò nei *Discorsi* che i corpi cadono con un moto uniformemente accelerato, stabilì la classica legge della caduta dei gravi, in più, ritornando sui suoi passi, stabilì la legge delle velocità.

[6] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.132

1.3 Christiaan Huygens

Huygens fu uno tra i principali filosofi naturali europei tra Cartesio e Newton, rispettando i principi della filosofia meccanica del suo tempo, concentrò i suoi studi, in particolare, sulle leggi dell'impatto, sulla caduta dei gravi e sulle proprietà del pendolo.

Huygens e le leggi dell'impatto
Le scoperte di Huygens sulle leggi dell'impatto vennero pubblicate nel volume postumo *De Motu corporum ex percussione.* I suoi studi e le sue ricerche si basavano sulle tre seguenti ipotesi:

1) Il *principio di inerzia.* "Un qualsiasi corpo in moto tende a muoversi in linea retta con la stessa velocità fino a quando non incontra un ostacolo[7]."

2) Il seguente principio. *Due corpi uguali che sono diretti l'uno contro l'altro con velocità uguali ed opposte prima dell'impatto, avranno, subito dopo l'impatto, velocità uguali ma con segno opposto rispetto a quello iniziale.*

3) La terza ipotesi afferma la *relatività del moto.*

Una prima conclusione quindi riguardo le leggi dell'impatto è la seguente proposizione.

Proposizione. *Si consideri un primo corpo, fermo, ed un secondo, uguale al primo, che collide contro di esso. Dopo l'impatto il secondo corpo si fermerà, mentre il primo avrà acquistato la stessa velocità che aveva il secondo prima dell'impatto.*

In seguito si propose di considerare l'impatto fra due corpi che non dovevano essere per forza uguali, e si occupò della conservazione delle velocità relative nell'impatto di due corpi elastici; infine dimostrò la seguente proposizione.

Proposizione. *Se due corpi, che si muovono in direzioni opposte e con velocità inversamente proporzionali alla loro grandezza collidono l'uno contro l'altro, dopo l'impatto ogni corpo riacquisterà la stessa velocità che aveva prima dell'impatto.*

[7] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.176

Nel dimostrare tale proposizione Huygens fa uso di un principio che meglio spiegherà in futuro nel famoso trattato *Horologium oscillatorium* e che si riduce, nei fatti, nel *principio di conservazione delle forze vive.*
Tale trattato rappresenta il maggior lavoro di Huygens riguardante la dinamica, contiene argomenti quali la teoria del movimento del pendolo, lo studio della caduta e del moto di un corpo lungo una cicloide[8] e i teoremi sulla forza centrifuga.

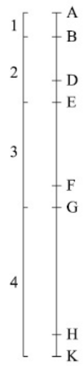
Huygens e la caduta dei corpi
Nello studio delle leggi dell'impatto Huygens aveva mostrato la sua propensione verso le convinzioni Cartesiane nell'estendere l'utilizzo della relatività del moto al fine di dimostrare tale leggi.
Tuttavia se pensato nel complesso possiamo etichettarlo come diretto successore di Galileo e Torricelli, e il collegamento tra questi e Newton. Usando le sue parole egli "avvalorò ed estese Galileo[9]" in materia della caduta dei gravi.
Huygens riaffermò il principio di inerzia e il principio della composizione del moto, e applicò questi principi alla caduta dei gravi e al moto rettilineo uniforme in ogni direzione. Accettò le leggi di Galileo sulla caduta rettilinea dei gravi e migliorò le dimostrazione ad esse associate. Per esempio, stabilì la seguente proposizione:

Proposizione. *In tempi uguali gli aumenti di velocità di un corpo che parte da fermo e cade verticalmente sono uguali, e le distanze percorse in tempi uguali formano una serie numerica in cui le differenze successive sono costanti.*

Dimostrazione. Si consideri un corpo, immobile nel punto A, e si supponga che esso cada lungo la distanza AB in un primo lasso di tempo, quando arriva nel punto B esso ha acquistato una certa velocità, che permette al corpo di cadere lungo BD in un secondo intervallo di tempo.
È noto che la distanze percorsa nel secondo lasso di tempo è maggiore della lunghezza del segmento BD, dato che la distanza BD può essere percorsa

[8] In geometria, la cicloide è una curva piana appartenente alla categoria delle rullette. Essa è la curva tracciata da un punto fisso su una circonferenza che rotola lungo una retta. Una cicloide è generata da un punto su una circonferenza che rotola su di una retta. Venne studiata per la prima volta da Cusano e ricevette il suo nome nel 1599 da Galileo. Si dedicarono allo studio di questa curva anche Torricelli, Fermat, Cartesio, Huygens, Bernoulli e Newton.

[9] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.182



anche se l'azione del peso del corpo cessasse nel punto B.
Infatti il corpo sarà animato da un moto costituito da il moto uniforme che consente al corpo di percorrere la distanza BD e dal moto della caduta del grave, grazie al quale il corpo ha percorso la distanza AB. Quindi alla fine del secondo istante di tempo il corpo arriverà nel punto E, ottenuto aggiungendo alla lunghezza BD la lunghezza DE che è uguale ad AB.
Allo stesso modo quindi, al termine del terzo lasso di tempo il corpo arriverà nel punto G, ottenuto considerando che $EF = 2BD$ e $FG = AB$. Lo stesso ragionamento quindi si ripete finchè il corpo non raggiunge il suolo.

In questo modo Huygens arrivò alla seguente proposizione.

Proposizione. *La distanza che un corpo, partendo da fermo, percorre in un certo lasso di tempo è la metà della distanza che il corpo avrebbe percorso muovendosi di moto uniforme con una velocità iniziale acquistata, cadendo, al termine del lasso di tempo considerato.*

Dimostrazione. Per mostrare quanto affermato Huygens considerò le distanze AB, BE, EG e GK percorse nei primi quattro intervalli di tempo, e raddoppiò il valore di questi istanti di tempo cosicchè il corpo percorresse la lunghezza AE nel primo istante e EK nel secondo istante.
Quindi necessariamente:

$$\frac{AB}{BE} = \frac{AE}{EK}$$

dunque

$$\frac{EK}{AE} = \frac{BE}{AB} = \frac{AD}{AB}$$

ora:

$$KE = 2AB + 5BD \quad e \quad EA = 2AB + BD$$

perciò:

$$KE - EA = 4BD$$

e di conseguenza

$$\frac{4BD}{AE} = \frac{AD - AB}{AB} = \frac{BD}{AB}$$

in conclusione

$$AE = 4AB \quad e \quad BD = 2AB.$$

Tali dimostrazioni sono molto differenti da quelle date da Galileo, in particolare egli fa uso della composizione delle velocità acquistate e della velocità in caduta del corpo ad ogni instante.
Inoltre cercò di dimostrare il seguente principio, che per Galileo doveva essere preso come postulato: *"Le velocità di un corpo che cade su piani con diversa inclinazione sono uguali, quando anche le altezze dei piani lo sono*[10]*, p.184"*. Egli mostrò che i tempi di caduta di un grave sono in relazione l'uno con l'altro come le lunghezze dei piani. Provò inoltre che quando un grave cade con un moto continuo da una determinata altezza lungo un certo numero di differenti piani inclinati, esso acquista sempre la stessa velocità che avrebbe acquistato se fosse caduto verticalmente dall'altezza data.

[10]R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988

Capitolo 2

Newton

2.1 Il metodo newtoniano

Grazie ai contributi di Galileo e Huyghens, la meccanica si era emancipata dalla disciplina scolastica: alcuni problemi essenziali come il moto di un proiettile nel vuoto e l'oscillazione di un pendolo composto erano già stati risolti. Tuttavia rimaneva il compito di costruire e organizzare il corpo dei principi della dinamica. Questo fu il lavoro di Newton, che collocò il suo sigillo sui fondamenti della meccanica classica e allo stesso tempo ne estese il campo di applicazioni ai fenomeni celesti.
Il suo lavoro e le sue scoperte vennero raccolte in un manoscritto: *Philosophiae naturalis principia matematica*(1687)[1], per i successivi trecento anni valido e attendibile testo scientifico per la meccanica classica. La loro pubblicazione avvenuta nel 1687 è considerata da molti la nascita della fisica moderna. Per la prima volta la meccanica venne trattata in modo sistematico e geometrico-matematico, anche se per la sua formulazione con l'analisi matematica si dovettero attendere le opere di meccanica di Eulero e quelle dell'epoca illuminista. Si tratta di un'opera divisa in tre libri: i primi due riguardano la matematica, applicata ai moti dei corpi del vuoto e nei mezzi resistenti come l'aria o l'acqua. Nel terzo libro presentò la sua cosmologia basata sull'idea che i pianeti si muovessero nello spazio vuoto, attratti verso il Sole da una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Newton procedeva attraverso un metodo che era allo stesso tempo razionale e sperimentale, e che porta ancora oggi il suo nome.
La prima regola consisteva nel non assumere altre cause ad eccezione di quel-

[1]Il manoscritto dei *Principia* fu depositato il 28 Aprile 1686, e venne pubblicato per la prima volta nel 1687, grazie all'intervento di Halley

le necessarie ad esprimere il fenomeno, la seconda nel mettere in relazione in maniera più completa possibile effetti analoghi alla stessa causa, la terza nell'estendere a tutti i corpi le proprietà uguali di corpi differenti, la quarta nel considerare vere proposizioni ottenute per induzione in seguito a esperimenti fino a prova contraria.
Questa ultima regola può essere ricollegata alla sua celebre affermazione, "Hypotheses non fingo[2]", in base alla quale egli si riprometteva di rifiutare qualsiasi spiegazione della natura che prescindesse da una solida verifica sperimentale; ovvero l'impegno a non assumere alcuna ipotesi che non fosse stata indotta da una rigida concatenazione di esperimenti e ragionamenti basati sulla relazione di causa e effetto. Restano quindi escluse tutte quelle "finte" ipotesi scientifiche sui fenomeni, proclamate, fino a quel momento, dalla metafisica.
Contando sulla terza di queste regole, Newton fu in grado di formulare la legge di gravitazione universale.

2.2 I concetti newtoniani

Newton introdusse la nozione di *massa* nella meccanica; tale nozione era già stata introdotta da Huyghens, ma appariva solamente in forma provvisoria.

Definizione 1. *La quantità di materia è la misura della materia stessa, derivante dalla sua densità unitamente alla sua mole.*

Ciò che Newton definì massa fu il frutto di varie considerazioni ed osservazioni, in particolare di quelle ottenute da esperimenti sul pendolo: in questi esperimenti egli lavorò con pendoli di diversi materiali ma con uguale lunghezza, stabilì che le rispettive accelerazioni non dipendevano dalla natura del materiale. Eliminò le variazioni della resistenza dell'aria utilizzando pendoli con sfere dello stesso diametro,adeguatamente svuotate per assicurarsi la parità di peso.
Quando Newton dichiarò che la massa poteva essere conosciuta attraverso il peso, egli intendeva il peso in un determinato luogo, era infatti pienamente consapevole del fatto il peso di un corpo variava a seconda della sua distanza dal centro della Terra, mentre la sua massa rimaneva costante.

[2]R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p. 200

Tale definizione della massa da parte di Newton venne ampiamente contestata principalmente per il fatto che non sembrava che la sua idea di massa fosse stata correttamente espressa.

Definizione 2. *La quantità di moto è la misura del moto stesso, derivante dalla velocità congiuntamente alla quantità di materia*

Definizione 3. *La vis insita, o forza innata della materia, è il potere di resistere attraverso il quale ogni corpo, in qualunque condizione si trovi, si sforza di perseverare nel suo stato corrente, sia esso di quiete o di moto lungo una linea retta*

Secondo Newton la vis insita era sempre proporzionale alla quantità di materia, egli le diede anche il nome di forza di inerzia. Tale forza è resistenza quando il corpo, cercando di mantenere il suo stato attuale, si oppone alla forza impressa; impulso quando il corpo, non dando libero corso alla forza impressa da un altro cerca di cambiare lo stato di quest'ultimo.

Definizione 4. *La forza impressa, vis impressa, è l'azione mediante la quale lo stato del corpo cambia, sia che si tratti di stato di riposo, sia di moto rettilineo uniforme.*

Secondo Newton la vis impressa era il determinante dell'accelerazione, essa risiedeva solamente nell'azione, e rimaneva nel corpo fino a quando l'azione terminava.

Definizione 5. *La forza centripeta è la forza per effetto della quale i corpi sono attratti, o sono spinti, o comunque tendono verso un qualche punto come verso un centro.*

Come esempi della forza centripeta, Newton citava la forza di gravità per effetto della quale i corpi tendono verso il centro della terra, la forza magnetica, e quella forza per effetto della quale i pianeti sono continuamente deviati dai moti rettilinei e sono costretti a ruotare secondo linee curve.
Egli inoltre distinse una quantità assoluta, una quantità accelerativa e una quantità motrice della forza centripeta (*Definizioni 5, 6, 7*).
La quantità assoluta dipendeva dall'efficacia delle cause che propagavano la forza centripeta; la quantità accelerativa era misurata dalla velocità prodotta in un determinato lasso di tempo, che oggi identifichiamo come l'accelerazione prodotta dalla forza.
Infine identificò la quantità motrice come la *quantità di moto prodotta in un dato lasso di tempo.* Perciò è la quantità motrice a soddisfare la legge che oggi scriviamo:

$$\vec{F} = m\vec{\gamma} \tag{2.1}$$

Per i corpi pesanti la quantità motrice venne quindi identificata con il peso. In questo modo Newton estese le sue teorie: invece di dedurre il concetto di forza motrice dal concetto di massa e accelerazione utilizzando la legge (2.1), considerò la massa e la forza come due distinte nozioni primarie.
Nei *Principia* inoltre trattò lo spazio e il tempo come enti assoluti ma, come già aveva fatto Galilei, riconobbe in una certa misura la relatività del moto: sosteneva infatti che il moto assoluto si debba misurare rispettivamente a dei punti immobili ma che "Non esistono luoghi immobili salvo quelli che dall'infinito e per l'infinito conservano, gli uni rispetto agli altri, determinate posizioni; e così rimangono sempre immobili e costituiscono lo spazio che chiamiamo immobile[3]."

2.3 Leggi del moto newtoniane

Nel primo e nel secondo volume dei *Principia* Newton dà alcune importanti definizioni, viste nel paragrafo precedente, e continua esponendo le tre fondamentali leggi del moto valide, seppur con qualche piccola modifica, anche oggi.
Newton enunciò come prima legge il principio di inerzia; tale principio era già stato scoperto da Galileo e riformulato da Huyghens:

Legge 1. *Ogni corpo preserva nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, finchè non è costretto da una forze impresse a cambiare tale stato.*

Inoltre egli ripetè l'idea secondo la quale la forza motrice sia il determinante dell'accelerazione:

Legge 2. *L'alterazione della quantità di moto è sempre proporzionale alla forza motrice impressa; e avviene secondo la linea retta lungo la quale la forza stata impressa.*

La terza legge costituisce il principio di azione e reazione:

Legge 3. *Ad ogni azione viene sempre opposta un'uguale reazione.*

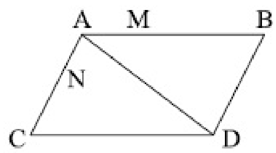
Nessuno prima di Newton aveva esposto questi principi in modo così chiaro e conciso, inoltre è interessante osservare come Newton omaggiò i suoi predecessori, come Galilei e Huyghens, senza i cui contributi non avrebbe potuto formalizzare correttamente le tre leggi del moto.

[3]R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.203

2.3.1 Newton e la legge dinamica di composizione delle forze

Mentre nel campo della statica Stevino e Roberval avevano già dato forma alla regola della composizione delle forze, Newton arrivò a dedurre la regola del parallelogramma delle forze con semplici considerazioni dinamiche.

Corollario 1. *(della seconda legge). Un corpo sotto l'azione di due forze congiunte descrive la diagonale del parallelogramma nel tempo stesso che impiegherebbe a descrivere i lati di esso sotto l'azione delle singole forze.*



Dimostrazione. Si consideri un corpo X, in stato di quiete nel punto A, ad esso viene impressa una forza M: il corpo si muove di moto rettilineo uniforme fino ad arrivare al punto B.
Allo stesso modo al corpo può essere applicata una forza N che che muove il corpo di moto rettilineo uniforme fino al punto C.
Si completi il parallelogramma ABCD.
A questo punto si osserva che se al corpo fossero applicate contemporamenamente le forze M e N, questo si muoverebbe sulla diagonale del parallelogramma, dal punto A al punto D.
Finchè la forza N agisce nella direzione della linea AC, parallela a BD, questa forza (per la seconda legge) non altererà la velocità generata dall'altra forza M, grazie alla quale il corpo viene trasportato lungo la linea BD. Il corpo quindi arriverà alla linea BD nello stesso tempo, sia che la forza N sia stata impressa, sia che non lo sia stata; perciò al termine di questo lasso di tempo il corpo si troverà da qualche parte sulla linea BD. Con lo stesso ragionamento esso si troverà, alla fine di questo lasso di tempo, da qualche parte sulla linea CD. Quindi si troverà sul punto D, dove entrambe le linee si incontrano. Ma X si muoverà in linea retta dal punto A al punto D per la prima legge.

Tale dimostrazione si basa chiaramente sul postulato dell'indipendenza delle forze. Affermare che il corpo si muove di moto rettilineo uniforme,

mostra che Newton considerava l'impulso della forza M o N durante un intervallo di tempo infinitesimo; tale forza agisce istantaneamente, come una percussione, e ciò spiega l'importanza delle leggi dell'impatto[4] nel pensiero di Newton.
A Newton è dovuta, quindi, la formulazione della nota regola del parallelogramma per la composizione delle grandezze fisiche vettoriali, anche se un primo accenno di questo metodo si trova, in realtà, già nelle opere meccaniche di Galileo.

Newton introdusse anche la nozione di quantità di moto, che egli chiama "momento", e la nozione di inerzia, che per lui è una "forza insita o innata", e che segna il punto di arrivo degli studi sulla conservazione del moto iniziati da Galilei e Descartes. Così Newton enuncia la legge di conservazione della quantità di moto, deducendola dalle Leggi 2 e 3 del moto

Corollario 2. *La quantità di moto che risulta dalla somma di tutti i moti aventi uno stesso verso e dalla differenza di quelli aventi verso contrario, non viene mutata dall'azione reciproca dei corpi.*

Grazie a tali considerazioni Newton dedusse la condizione di equilibrio per semplici macchine, come la bilancia o il piano inclinato. Come diversi studiosi prima di lui, anche per Newton la composizione delle forze con la regola del parallelogramma traeva le sue origini dalla dinamica, ma al contrario di molti pensava che la forza fosse il generatore della quantità di moto in un dato istante elementare.
Ricerche storiche accurate hanno stabilito che il contenuto del Libro I non è interamente originale: a Newton spetta comunque il merito di aver saputo raccogliere l'eredità dei suoi predecessori, restituendola, sulla carta, in una veste del tutto nuova. Nessuno, prima di lui, era stato in grado di costruire la meccanica dell'universo come un sistema unitario, fondato su assiomi da cui tutto il resto può essere dedotto.
Lo storico Truesdell, parafrasando le espressioni di ammirazione che i *Principia* di Newton suscitarono nei suoi contemporanei, disse: *"Ciò che Newton scrive corretto, limpido, e coinciso. Nelle opere precedenti gli splendidi diamanti della scoperta giacevano segreti in una opaca matrice fatta di complessi casi particolari, dettagli laboriosi, metafisica, confusione ed errore, mentre Newton segue una vena di oro puro*[5]*."*

[4]Gli studenti di meccanica nel XVII Secolo percepivano il fenomeno dell'impatto come un mezzo per concretizzare l'effetto di una forza come velocità acquistata nell'istante iniziale.

[5]C. Truesdell, *Essays in the history of mechanics*, Springer-Verlag, 1968.

2.4 Moto dei corpi

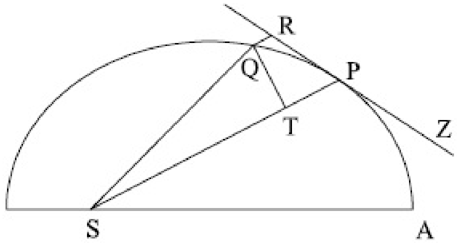
In seguito a queste scoperte, Newton iniziò a descrivere il moto dei corpi, ad analizzare casi particolari e a enunciare teoremi sul movimento; il tutto trattato geometricamente senza far ricorso al calcolo infinitesimale.
Il primo libro dei *Principia* chiamato: *Sul moto dei corpi* esso è dedicato allo studio della dinamica dei corpi liberi immersi nel vuoto ed è formato da quattordici sezioni. Vengono trattati i problemi del moto di un punto materiale soggetto a una forza centripeta, che descrive nei diversi casi orbite circolari, ellittiche, paraboliche o iperboliche.
Utilizzando semplici argomentazioni geometriche, Newton stabilì che il moto di un punto materiale soggetto a una forza centripeta era contenuto in un piano e che per questo era valida la legge delle aree formulata da Keplero.
Newton inoltre considerò l'inverso di questa proposizione: esaminò la traiettoria circolare di un corpo gravitante attorno al centro della propria traiettoria: la sua gravità coincideva con la forza centripeta. Quindi la gravità poteva essere valutata utilizzando le proposizioni enunciate da Huyghens nel suo *Horologium oscillatorium*[6].
Newton si occupò inoltre di studiare il moto di una particella che descriveva un'orbita circolare sotto l'azione di una forza emanata da qualsiasi punto di un piano circolare.
Utilizzano tali osservazioni giunse ad affrontare il fondamentale problema del moto dei pianeti. Nei *Principia* vengono quindi trattati anche problemi astronomici legati alla determinazione del moto di pianeti attorno al Sole, dei satellii attorno ai pianeti o del moto delle comete.

2.4.1 Spiegazione del moto dei pianeti

Questa la spiegazione che Newton diede riguardo al moto dei pianeti:

Si consideri un corpo P, che ruota attorno un centro S, esso descrive una linea curva APQ, e sia la linea retta ZPR la sua tangente nel punto P. Preso un qualsiasi punto Q sulla linea curva si consideri la retta QR parallela a SP, tale retta incontra la retta tangente in P ne punto R; inoltre sia QT la retta perpendicolare a ST. La forza centripeta varrà reciprocamente quanto il solido: $\frac{SP^2 * QT^2}{QR}$, se il solido viene considerato della grandezza pari a quella ottenuta quando i punti P e Q coincidono.

[6] Tali proposizioni vennero incluse, senza prove, da Huyghens al termine del suo trattato.



Infatti QR coincide con il senoverso[7] del doppio dell'arco QP, il cui punto di mezzo è il punto P, e allo stesso modo al doppio del triangolo SQP, in maniera equivalente $SP \times QT$ è proporzionale al tempo impiegato per descrivere il doppio arco, può essere quindi usato per l'esponente del tempo.
La quantità QR viene oggi chiamata, in cinematica, deviazione.
Questa deviazione ha valore $\vec{\gamma}\frac{dt^2}{2}$ dove $\vec{\gamma}$ è l'accelerazione. Ora, in questo caso, poichè l'accelerazione è centrale, come la forza, e poichè questa passa attraverso il polo S, si può notare che QR è parallelo a SP. Dato che è possibile applicare la legge delle aree, l'area del triangolo SPQ è proporzionale a dt.
Siccome la forza è essa stessa proporzionale all'accelerazione, in ultima analisi la forza è inversamente proporzionale all'espressione $\dfrac{SP^2 * QT^2}{QR}$.

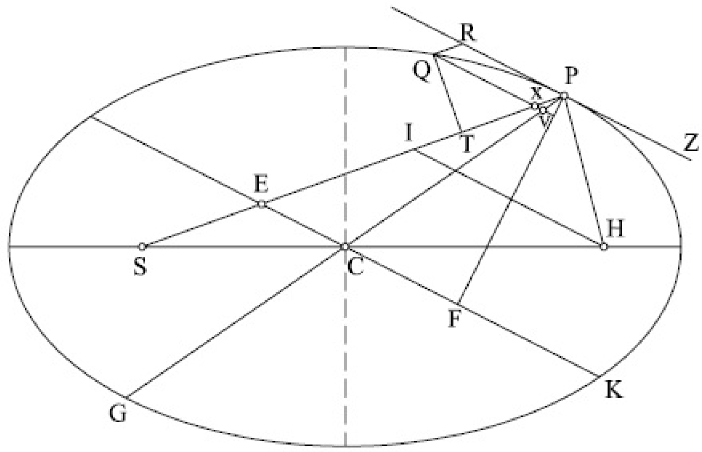
Newton applicò questa legge generale a particolari traiettorie: le sezioni coniche.
A causa della complessità della soluzione originaria esposta da Newton, vediamone l'applicazione alla traiettoria ellittica e i passi essenziali del suo ragionamento.

Sia DK il diametro coniugato di CP, Newton verifiò per prima cosa che $PE = a$, successivamente, disegnando la linea Qxy parallela alla tangente, sezionando SP e PC in x e v, verificò che

$$\frac{QR}{Pv} = \frac{PE}{PC} = \frac{a}{PC}$$

per le proprietà di similitudine dei triangoli. Allo stesso modo, se QT è

[7] In matematica il senoverso è una funzione goniometrica definita come: $senoverso(\theta) = 1 - \cos(\theta) = 2\sin^2(\frac{\theta}{2})$. Il senoverso è il complemento a 1 del coseno: infatti il senoverso assieme al coseno corrispondono al raggio della circonferenza trigonometrica, che è unitario.



perpendicolare a SP e PF è perpendicolare alla tangente,

$$\frac{Qx}{QT} = \frac{a}{PF}$$

. Più rapidamente, attraverso il Teorema di Apollonio[8]

$$\frac{a}{PF} = \frac{CD}{b}$$

Quindi

$$QR = \frac{a * Pv}{PC}, \qquad QT = \frac{PF * Qx}{a} = \frac{b * Qx}{CD}.$$

Ora al limite quando Q tende a P, $\frac{Qv}{Qx}$ tende all'unità. Perciò

$$\lim QT = \frac{b * Qv}{CD}.$$

È possibile quindi formare la seguente espressione

$$\lim \frac{SP^2 * QT^2}{QR} = \lim SP^2 \frac{Qv^2 * b^2 * PC}{CD^2 * a * Pv}.$$

Attraverso l'equazione dell'ellisse riferita agli assi obliqui coniugati CD e CP

$$\frac{Qv^2}{CD^2} + \frac{Cv^2}{CP^2} = 1$$

[8]nell'ellisse la somma dei quadrati delle lunghezze di due semidiametri coniugati è costante e l'area del parallelogramma avente per lati due semidiametri coniugati è ancora costante.

Si ottiene

$$\frac{Qv^2}{CD^2} = \frac{CP^2 - Cv^2}{CP^2} = \frac{(CP + Cv)Pv}{CP^2}.$$

Allora

$$\lim \frac{SP^2 * QT^2}{QR} = \lim SP^2 \frac{(CP + Cv)Pv * b^2 * PC}{a * Pv * CP^2} = \frac{2PC^2b^2}{aPC^2} SP^2 = \frac{2b^2}{a} SP^2$$

In conclusione la legge della forza è inversamente proporzionale alla distanza. Tale prova appoggia la definizione newtoniana di forza, sia attraverso l'utilizzo dell'idea di deviazione in cinematica, sia come diretto argomento della geometria infinitesimale, facendo uso delle classiche proprietà delle coniche. Fatta eccezione per alcune proprietà delle coniche, tutti i passi precedenti erano sconosciuti ai predecessori di Newton, nonostante essi siano indispensabili al fine di giustificare le leggi di Keplero della meccanica dei corpi celesti.

2.4.2 Legge di attrazione universale

Il Libro III riguarda l'ordinamento del sistema del mondo e contiene la famosa legge della gravitazione universale.
La caduta di una mela ovviamente non poteva essere sufficiente per suggerire a Newton la legge di gravitazione universale, essa fu piuttosto il prodotto di un lungo cammino percorso da numerosi suoi predecessori e culminato nell'esposizione di tale legge.
Tra gli studiosi che prima di lui intrapresero questo percorso ricordiamo, fra tanti, Galilei, che si oppose alle tesi del sistema copernicano, e Keplero, il quale, nonostante le valenti scoperte, in particolare la legge delle aree, credeva erroneamente che la forza fosse proporzionale alla velocità.

Newton quindi, quando si dedicò a tali studi, era in possesso della legge del moto circolare uniforme; procedendo come già prima di lui era stato fatto, partì dalla terza legge di Keplero, e stabilì che l'attrazione fosse inversamente proporzionale al quadrato della distanza (legge dell'inverso del quadrato). Tuttavia, in maniera più rigorosa rispetto ai suoi predecessori, cercò una verifica sperimentale a questa legge.
Tentò quindi di scoprire se l'attrazione esercitata dalla Terra sulla Luna era in grado di soddisfare tale legge, e se tale attrazione poteva essere identificata con il peso (gravità) terrestre.

Il ragionamento di Newton fu il seguente: assumendo che la Luna abbia moto circolare, considero R_t il raggio terrestre[9], la Luna si troverà a una di-

[9]Stimato per la prima volta da Erastotene

stanza di 60 raggi terrestri dalla Terra, quindi la forza che mantiene la Luna in orbita è 3600 volte inferiore rispetto al peso calcolato al centro della Terra, utilizzando la legge dell'inverso del quadrato.
Quindi lasciando cadere liberamente un corpo in prossimità della Terra, esso copre una distanza di 15 piedi[10] nel primo secondo, perciò, con lo stesso ragionamento, la Luna cadendo sulla Terra coprirebbe, nel primo secondo, una distanza pari a $\frac{1}{20}$ di pollice.
Seguendo questo procedimento i primi calcoli furono errati, ma quando, sedici anni dopo (1682), Picard diede l'esatta misura di un meridiano terrestre, Newton ottenne il valore atteso di $\frac{1}{20}$ di pollice.
Una volta ottenuti questi risultati fu in grado di dichiarare la dottrina della gravitazione universale, e quindi la famosa legge di gravitazione universale:

Se la massa di due globi gravitanti l'uno verso l'altro è omogenea a distanze uguali dai loro centri, i due globi si attraggono con una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i loro centri.

Questa legge, che Newton applica alla Terra, al Sole, alla Luna, a Saturno e Giove con i rispettivi satelliti (scoperti da Galilei e da lui studiati nel Sidereus Nuncius), rappresenta un'unificazione della teoria del moto dei pianeti. Essa venne così riassunta dallo stesso Newton:

I satelliti di Giove gravitano verso Giove, quelli di Saturno verso Saturno, e i pianeti verso il Sole; e le loro forze di gravità li ritraggono dal moto rettilineo e li trattengono nelle loro orbite curvilinee.

La forza di attrazione gravitazionale svolge dunque, nel moto curvilineo dei pianeti, il ruolo di forza centripeta: si tratta della forza che in ogni punto della traiettoria agisce sul corpo in movimento puntando verso quello che, in quel punto, è il centro di curvatura della traiettoria stessa. Oggi sappiamo che la forza centripeta è ortogonale alla tangente alla traiettoria in quel punto. Newton trovò un criterio geometrico per determinare la normale, ed una formula che diede il valore della forza ad ogni istante in funzione della velocit. Nei *Principia* fu Newton a coniare il termine forza centripeta, ma il primo a studiare il fenomeno era stato Huyghens.
Dalla legge della gravitazione universale è possibile dedurre facilmente le tre leggi di Keplero, e spiegare fenomeni come le perturbazioni del moto della Luna (dovute all'attrazione da parte della Terra e del Sole, e che gi Tolomeo aveva osservato), il moto delle comete, la precessione degli equinozi, il feno-

[10]Tutte le unità di misura utilizzate nei *Principia* sono francesi

meno delle maree.

Considerando il complesso delle opere fisiche di Newton, ci si accorse che egli fu il primo a riconoscere l'esistenza di due forze d'attrazione: quella che oggi chiamiamo debole, e che si esercita tra grandi masse collocate a grandi distanze, e quella forte, che si esercita tra piccole particelle vicine.
Inoltre il fatto di aver riconosciuto un'analogia sostanziale tra le forze che governano il moto dei pianeti e quelle che risiedono nella struttura microscopica della materia costituisce la prima importante intuizione dell'uniformità delle leggi naturali. Quando, nel 1666, Newton vide cadere la leggendaria mela dall'albero, egli pensò che se la Luna fosse stata al posto di quel frutto, essa si sarebbe comportata allo stesso modo. L'idea che i corpi potessero esercitare forze a distanza venne rifiutata da molti contemporanei di Newton, tra cui lo stesso Huyghens.

Infine, dalla lettura delle pagine del libro III emerge chiaramente la distinzione che Newton fece tra i concetti di massa (quantità di materia) e peso:

Tutti i corpi gravitano verso i singoli pianeti, e, a pari distanza dal centro, i loro pesi su di uno stesso pianeta sono proporzionali alla loro quantità di materia.

2.5 Il contributo di Leibniz

È interessante notare quale fosse la nozione di forza per Leibniz e citare il suo contributo alla meccanica classica.
Secondo Leibniz, la vera natura della materia è la forza. Essa è presente anche dove non si vede movimento: la quiete, infatti, è, a suo dire, energia contratta, pronta ad essere esplicitata una volta venuto a meno l'impedimento di un'energia contraria.
L'estensione e il movimento rimandano alla forza, di cui ne sono espressione.
Uno dei contributi fondamentali di Leibniz fu la distinzione tra "forze vive" e "forze morte". Secondo il suo pensiero infatti la forza poteva essere di due differenti nature: una forza elementare, che egli chiamava "forza morta" poichè in essa il moto non esiste ancora, esiste solo una sollecitazione al moto, e una seconda forza, quella ordinaria, associata al moto, che egli chiamava "forza viva".
Esempi di forza morta sono la forza centrifuga, la gravità o la forza centripeta.

Il legame tra le due è estremamente stretto, poichè secondo Leibniz la forza viva nasce a causa di infinite impressioni da parte di una forza morta.
Nel linguaggio moderno, quanto appena detto, può essere espresso nella maniera seguente:

$$d(m\frac{v^2}{2}) = F * ds.$$

Questo conduce alla legge fondamentale:

$$m\frac{dv}{dt} = F$$

e identifica la forza morta come la forza statica.

Capitolo 3

Discussione dei principi newtoniani

La discussione dei principi newtoniani caratterizzò la seconda metà del diciannovesimo secolo e gli inizi del ventesimo secolo, fino alla prima esposizione della teoria della relatività. Molti furono gli scienziati che presero parte a questo dibattito e che esposero una loro idea su quanto Newton aveva dichiarato prima di loro.

3.1 Barré de Saint-Venant

La forza era per lui "una sorta di intervento di una natura metafisica o occulta[1]" che non appare nei dati e nemmeno nei risultati di generico un problema di meccanica terrestre o celeste.
Le osservazioni da lui fatte avevano mostrato che quando un corpo assume una determinata accelerazione, e di conseguenza una velocità, è necessario che altri corpi mutino il loro stato rispetto a quello da esso assunto. E lo stesso vale anche nel caso in cui il corpo si muove già con una certa velocità, inoltre l'accelerazione derivata da questo cambiamento di stato è indipendente dalla velocità posseduta.
Nell'impatto tra due corpi identici la velocità ottenuta da un corpo si suppone sempre uguale a quella ottenuta dal secondo; se i due corpi sono differenti per il volume o il materiale di cui sono costituiti, le velocità ottenute nell'impatto non saranno uguali ma il loro rapporto sarà costante.
Barré de Saint-Venant tentò di spiegare questi fatti sperimentali con la se-

[1] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.436

guente legge generale:

"I corpi si muovono come un sistema di punti che hanno, in ogni istante, nello spazio, determinate accelerazioni, le cui componenti geometriche, che sono dirette lungo le linee che uniscono i punti e variano a seconda della lunghezza delle linee stesse ma non per la velocità dei punti, sono sempre uguali e opposte per due punti tra cui ogni linea rappresenta la misura della distanza."
Basandosi su questa legge generale, egli introdusse i concetti di forza e massa .

"Le masse sono quei valori che sono proporzionali al numero di punti elementari necessari per supporre un determinato corpo e, comparando questi valori con altri, essi servono per spiegare i vari moti assunti mediante l'utilizzo della legge generale."

"Le forze attrattive o repulsive di diversi corpi, considerate a due a due, sono le linee proporzionali alle risultanti delle accelerazioni reciproche dei propri punti elementari, in accordo con la legge generale."

In questo modo Barré de Saint-Venant giunse alle seguenti definizioni:

"*Massa.* La massa di un corpo è il rapporto tra due valori che esprime quante volte questo e un altro generico corpo, scelto arbitrariamente ma sempre lo stesso, contiene parti che, pur essendo separate, collidono tra di loro a due a due, e trasmettono velocità uguali e opposte tra loro."

"*Forza.* La forza di un corpo su di un altro è una linea la cui lunghezza è data dal prodotto fra la massa del secondo corpo e l'accelerazione dei sui punti verso quelli del primo corpo; la direzione della forza è la stessa dell'accelerazione."

Per apprezzare queste definizioni bisogna sottolineare che Barré de Saint-Venant fu un convinto atomista; inoltre, seguendo il suo punto di vista, si rifiutò di discutere se le masse fossero in qualche modo collegate con le quantità di materia di diversi corpi eterogenei, e se le forze fossero in qualche modo in relazione con le cause efficienti del moto.

3.2 Reech

In contrasto con le idee di Barré de Saint-Venant, Reech adottò lo stesso punto di vista di Eulero, considerando il concetto di forza come un punto di partenza.
Secondo Reech la parola *forza* non denota la causa di un moto, ma "quell'effetto di qualsiasi causa, chiamato trazione, che ci figuriamo con filo teso, e che dovrebbe essere privato della sua qualità materiale di massa[2]."
Reech quindi immaginò una particella attaccata a un filo: provocando un allungamento del filo, viene prodotta una forza e il moto della particella viene modificato. La particella oppone una forza di inerzia al filo, la forza del filo è misurabile direttamente tramite l'elongazione del filo stesso, e la forza di inerzia vale mf, dove m è la massa e si deduce da

$$\vec{F} = m\vec{f}.$$

Come Huyghens prima di lui, egli suppose, come caso particolare, che il filo venisse tagliato improvvisamente: l'accelerazione della particella subiva una discontinuità

$$\vec{f} = \vec{\gamma} - \vec{\gamma'}$$

e dall'esperimento risultava il valore $\vec{\gamma'}$.
Giunto a questo punto intendeva verificare l'identità di $\vec{f}$; fu subito evidente per Reech che $\vec{F}$ fosse proporzionale alla massa, quindi

$$\vec{F} = m\vec{f}\psi(f...)$$

dove ψ poteva dipendere, a priori, dal tempo, dalla posizione e dalla velocità del punto.
Tuttavia egli escluse ogni tipo di dipendenza dalla posizione della particella, inoltre osservando un filo a piombo e il carattere arbitrario del sistema di riferimento escluse anche la dipendenza dal tempo e dalla velocità della particella. Quindi:

$$\vec{F} = m\vec{f}\psi(f).$$

Per il principio di indipendenza degli effetti parziali di varie forze simultanee risultò chiaro che ψ non potesse essere altro che una costante. La legge del moto risulta quindi:

$$\vec{F} = m(\vec{\gamma} - \vec{\gamma}').$$

Se la forza $\vec{F}$ scompare o si esaurisce, risuterà che, in accordo con la legge di Reech,

$$\vec{\gamma} = \vec{\gamma}'$$

[2]R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988, p.438

e il moto della particella sarà completamente libero.
Supponendo che gli assi di riferimento coincidano con un sistema di riferimento cartesiano, gli esperimenti di Reech mostrarono che

$$\vec{\gamma}' = \vec{g}.$$

Le sue osservazioni mostrarono anche che un corpo in movimento non era interessato solo dalla forza di gravità, ma anche da cause di tipo elettrico e magnetico, perciò, al fine di includere anche queste, decompose l'accelerazione $\vec{\gamma}'$ nella forma:

$$\vec{\gamma}' = \vec{\gamma_0'} + \vec{\gamma_0''}$$

scrivendo quindi la legge del moto come segue

$$\vec{F} = m(\vec{\gamma} - \vec{\gamma_0}' - \vec{\gamma_0}'')$$

o in alternativa

$$\vec{F} + m\vec{\gamma_0}' = m(\vec{\gamma}' - \vec{\gamma_0}'').$$

Il termine di sinistra venne identificato come *forza totale*, ottenuta come somma di F *forza effettiva* e di $m\vec{\gamma_0}'$, una forza che egli stesso definì di "misteriosa azione". Per evitare che questa forza causasse vane complicazioni, egli scelse, per convenzione, il moto rettilineo uniforme di una particella libera, cioè non soggetta ad una forza totale; questo comporta l'annullamento di $m\vec{\gamma_0}'$, la legge diventa quindi:

$$\vec{F} + m\vec{\gamma}_0' = m\vec{\gamma} = \vec{F_0} = forza\ \ totale.$$

Inoltre se le velocità non erano interessate da alcuna discontinuità, la differenza $\vec{\gamma} - \vec{\gamma}'$ risultava indipendente dal sistema di riferimento scelto , mentre $\vec{\gamma}$ e $\vec{\gamma}'$ prese separatamente dipendevano dal sistema di riferimento; perciò la legge fondamentale

$$\vec{F} = m(\vec{\gamma} - \vec{\gamma}')$$

era indipendente dal sistema di riferimento scelto, di più tale legge era la stessa per due sistemi di riferimento in moto continuo uno rispetto all'altro.

3.3 Kirchhoff

Kirchhoff cercò di sviluppare la struttura logistica della meccanica, ovvero tentò di costruire la meccanica utilizzando le nozioni di spazio, tempo e materia, e, se necessario, i concetti di forza e massa derivati dalle tre nozioni

precedenti.
Ad esempio il moto di una particella può essere descritto utilizzando le sue coordinate, prese come funzioni del tempo, o, in alternativa possono essere utilizzate le componenti della sua velocità, sempre prese come funzioni del tempo. Allo stesso modo, anche le componenti della sua accelerazione sarebbero in grado di descrivere il moto di tale particella. Questa procedura quindi può essere utilizzata mediante l'ausilio dell'operazione di derivata; in questo modo quindi Kirchhoff riscrisse le equazioni del moto in questo modo:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X \qquad \frac{d^2y}{dt^2} = Y \qquad \frac{d^2z}{dt^2} = Z$$

dove il termine destro di queste equazioni rappresentava uno dei componenti della forza accelerativa che agisce su una particella di massa unitaria. Una particella poteva dirsi quindi soggetta ad un sistema di forze se il suo moto era il risultato del sistema

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X_1 + X_2 + ... \quad \frac{d^2y}{dt^2} = Y_1 + Y_2 + ... \quad \frac{d^2z}{dt^2} = Z_1 + Z_2 + ...$$

Un sistema di forze agenti su di un unico punto era sempre equivalente ad un'unica forza, data dalla risultante del sistema:

$$X = X_1 + X_2 + .. \quad Y = Y_1 + Y_2 + .. \quad Z = Z_1 + Z_2 + ..$$

e quando il sistema consisteva in due sole forze, queste equazioni rappresentavano l'espressione analitica del teorema del parallelogramma delle forze.
A questo punto Kirchhoff fece la seguente osservazione: tutte le forze (X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)... ad eccezione di una, potevano essere scelte arbitrariamente, e la rimanente veniva scelta in modo tale che la risultante coincidesse con l'accelerazione. La meccanica, secondo Kirchhoff, non era in grado di dare una definizione completa del concetto di forza. Tuttavia diversi esperimenti mostrarono che, nei moti naturali, potevano essere sempre trovati dei sistemi le cui forze separate potevano essere osservate più facilmente rispetto alla forza risultante di tutte queste. A questo punto egli considerò, in accordo con la legge di Newton, il moto conservativo di n particelle sotto l'azione della propria mutua forza; considerando poi l'espressione del moto di una singola particella, egli ottenne il seguente vincolo:

$$\varphi(x, y, z, t) = c$$

e le equazioni del moto diventarono:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X + \lambda\frac{\delta\varphi}{\delta x} \quad \frac{d^2y}{dt^2} = Y + \lambda\frac{\delta\varphi}{\delta y} \quad \frac{d^2z}{dt^2} = Z + \lambda\frac{\delta\varphi}{\delta z}$$

in questo modo esse preservavano la loro forma in qualsiasi sistema di assi rettangolari se la forza data (X, Y, Z) era indipendente dal sistema di coordinate.
Questa sua esposizione puramente logica della meccanica incoronò quindi una struttura che era già apparentemente completa.

3.4 Poincarré

Nei suoi scritti Poincarré diede corso a diverse discussioni riguardanti i principi della meccanica classica. La sua intenzione principale era quella di distinguere cosa fosse un esperimento, cosa un ragionamento matematico, cosa una convenzione ed infine cosa fosse un'ipotesi.
La meccanica conteneva serie difficoltà, infatti, anche se i moti relativi potevano solo essere immaginati, li idealizzava in uno spazio assoluto; mentre il tempo assoluto non rappresentava altro che una convenzione. In definitiva poteva quindi sembrare lecito ricorrere ad uno spazio non euclideo per descrivere tali moti, tale spazio per la geometria euclidea avrebbe rappresentato esso stesso una sorta di convenzione.
Poincarré dava la seguente seguente definizione di forza: *la forza è uguale al prodotto della massa per l'accelerazione per definizione.* Allo stesso modo un'azione è uguale alla sua reazione per definizione. Questi principi erano per lui inverificabili, poichè non esistono in natura dei sistemi perfettamente isolati. Esistono però sistemi che sono approssimativamente isolati, e in questi i principi newtoniani valgono con una certa approssimazione.
Poincarré discusse anche le tesi di Kirchhoff, il quale asseriva che la nozione di forza fosse una *nozione primitiva, irriducibile e indefinibile*, l'intuizione diretta di cosa sia il concetto di sforzo. E, giunto a questo punto, mosse diverse critiche alla meccanica di Reech: la forza era stata definita come la forza a cui è soggetto un filo dopo essere stato deformato, inoltre, se un corpo era attaccato ad un'estremità di un filo, lo sforzo che viene trasmesso al corpo dal filo era uguale all'azione che il corpo esercitava sul filo. In questo modo, veniva utilizzato il principio di uguaglianza tra azione e reazione, considerandolo non come una verità sperimentale, ma come la vera definizione di forza.
In conclusione, in seguito alle varie discussioni mosse, egli decretò che la legge dell'accelerazione e la legge del parallelogramma di forze fossero solamente convenzioni; tali convenzioni però non erano arbitrarie, esse erano infatti il prodotto di esperimenti imperfetti che, tuttavia, erano sufficienti a giustifi-

carle.

La discussione dei principi newtoniani non terminò con Poincarrè, anzi proseguì per mano di molti altri scienziati.
Le controversie sul valore dei principi e dei concetti newtoniani rappresentavano infatti un argomento di grande interesse e molti scienziati del tempo tentarono di contribuire al loro perfezionamento.
Essi mostrarono chiaramente che la classica struttura che sembrava già essere completa con il lavoro di Lagrange, non poteva certo essere ritenuta come perfetta. Proclamarono la necessità di una revisione alla luce di nuovi dati sperimentali.

Tale revisione ha avuto luogo nel ventesimo secolo, dando vita a nuove teorie fisiche della meccanica.

Un punto di vista più moderno sulla discussione dei principi newtoniani ci viene dato invece da Lucio Russo, che riprende vari aspetti della meccanica con occhio critico e molto più attuale.

3.5 Lucio Russo

3.5.1 La filosofia naturale di Newton

Esaminando il rapporto tra scienza ellenistica e scienza moderna, Russo non potè fare a meno di considerare i *Principia*, poichè Newton viene spesso considerato come il principale fondatore della scienza moderna.
Russo quindi cominciò con il ricordare come Newton esaminava il concetto di spazio: le sue idee sembravano trarre origine da quelle di Aristotele, con la differenza che, anche se per Newton lo spazio era assoluto come per Aristotele, esso non corrispondeva ad alcun dato empirico. Di conseguenza i moti di cui Newton si occupava erano moti non percepibili, la sua natura era una natura che trascendeva l'esperienza.
Sul concetto di spazio Newton costruì i concetti di moto e forza: in particolare le forze newtoniane rappresentavano le cause efficienti dei moti assoluti; Russo notò a questo punto che, secondo Newton, sembrava non potessero esistere dei "moti veri" senza le forze che ne sono la causa, quindi in alcuni passi sembra che sia egli stesso non accettare il principio di inerzia.
Russo si soffermò sulle definizioni iniziali date da Newton[3] nei Prinicipia, tentando di commentarle in maniera più moderna possibile: innanzi tutto a

[3] capitolo 2, i concetti newtoniani

suo parere l'intenzione di Newton sembrava essere quella di sviluppare una filosofia della natura basata su concetti aristotelici; ciò nonostante la meccanica newtoniana, poggiando su queste basi, era diventata fin da subito una vera e propria teoria scientifica. Secondo Russo rileggendo le definizioni ci si accorge subito che la prima pare priva di senso, poichè la densità potrebbe essere definita solamente andando incontro ad una tautologia; la seconda è inutilizzabile poichè dipende dalla prima, la terza e la quarta sono interessanti perchè inseriscono nel quadro aristotelico l'idea fino ad allora estranea di considerare "secondo natura" sia la quiete che il moto rettilineo uniforme, chiamando le " forze impresse" le cause efficienti della deviazione di tale moto. La definizione successiva è strana, nel senso che ci si chiede come mai, subito dopo la generalissima definizione di forza, Newton abbia inserito quella di forza centripeta, infatti, se come in effetti sembra, si tratta della gravitazione, ci si chiede perchè i corpi non si attraggono reciprocamente ma siano attratti da un punto, e quali siano i punti che attraggono, o di cosa siano i centri.
Russo osservò che la definizione 5 era la traduzione di un passo di Plutarco; sorse quindi il dubbio che le definizioni su cui si basa l'opera fondamentale della scienza moderna fossero state influenzate da un tardo poligrafo quale Plutarco: quando Newton stesso spiega la definizione 5 si riconoscono, attraverso le sue parole, proprio quelle di Plutarco.

3.5.2 Legge di gravitazione universale

Russo notò che Plutarco non era l'unica fonte letteraria classica usata da Newton, egli riconobbe infatti che, in diversi passi di tema astronomico, anche se non citata esplicitamente, la fonte era evidentemente Seneca.
Il salto concettuale compiuto per passare da un'astronomia descrittiva alla teoria della gravitazione consistette nel riconoscere che le regolarità osservate nel moto dei pianeti non dipendevano dalla natura celeste dei corpi, ma solo dal fatto che essi fossero corpi pesanti. Questo salto era stato compiuto solo una volta nella storia: dalla scienza ellenica.
Quindi affichè la moderna dinamica basata sulla gravitazione potesse affermarsi come teoria scientifica furono necessari, secondo Russo, due gruppi di elementi.
Il primo gruppo era formato da strumenti tecnici e metodologici ellenistici, contenuti in particolare nelle opere di Archimede e Euclide, quali: il metodo assiomatico-deduttivo, il metodo di esaustione e la meccanica di Archimede.
Il secondo gruppo era formato da un insieme di informazioni sulla dinamica e la gravitazione disperse in varie opere, tra queste vi erano certamente: le indicazioni sul principio di inerzia, le forze centrifughe e la gravità trasmesse

da Plutarco, varie informazioni complementari a queste contenute nelle opere di Erone, Aristotele e Simplicio, e fonti di meccanica celeste di diversi autori classici. A queste si aggiungevano anche alcune testimonianze sulla teoria delle maree, basata sull'interazione gravitazionale.
Gli elementi di questi due gruppi però non parevano sufficienti, perciò l'ultimo essenziale elemento necessario a completare i due gruppi era la teoria delle sezioni coniche di Apollonio di Perga: poichè le orbite dei corpi sottoposti ad un campo gravitazionale centrale sono sezioni coniche, dal punto di vista matematico, la teoria della gravitazione poteva essere pensata come un insieme di esercizi di teoria delle coniche.
Il recupero della teoria di Apollonio era stato uno dei principali obbiettivi dei matematici del XVII secolo; tra questi vi erano Bonaventura Cavalieri, Wallis e Borelli, quest'ultimo incluso da Newton tra i suoi predecessori a proposito della legge di gravitazione universale. Il recupero di Apollonio continuò anche dopo la pubblicazione dei Principia, una prima edizione critica venne curata da uno dei maggiori studiosi del tempo: Edmond Halley, amico di Newton al quale si deve la riscoperta delle comete periodiche e l'ellitticità delle loro orbite.
L'opera di Newton era quindi basata su tutti gli elementi elencati. La teoria della gravitazione era riuscita a raggiungere rapidamente lo stato di teoria scientifica, nonostante evidenti debolezze metodologiche dei suoi fondamenti, e Russo sospettava che questo fosse avvenuto perchè la coerenza tra diversi elementi era assicurata dalla loro origine comune, ovvero: le affermazioni aristoteliche, anche se erano state inserite da Newton all'inizio dell'opera, non potevano alterare le dimostrazioni di teoremi sulle coniche effettuate seguendo il modello di Apollonio. Newton era consapevole dell'importanza delle conoscenze tramandate dall'antichità, ma non riuscì a riconoscerne l'origine nella scienza ellenistica: attribuiva infatti la profondità del pensiero degli "Antichi" ad una Verità originaria.
Il punto essenziale del discorso, secondo Russo, era quello di capire se la legge di gravitazione universale o dell'inverso dei quadrati era già nota nell' "antichità". Lo stesso Newton riteneva che la legge dell'inverso dei quadrati fosse già una conoscenza pitagorica; inoltre l'idea di utilizzare la legge dell'inverso dei quadrati per dedurne le leggi di Keplero era venuta, prima che a Newton, almeno a Hooke nel 1600, a Wren e a Halley.
La legge di per sè era molto antica: nel '600 era già stata enunciata da Boullian, sulla base che, la forza del Sole, come la luce e il calore emessi, dovesse diminuire con la distanza in modo inversamente proporzionale all'estensione della regione raggiunta. Le considerazione di Boullian non erano però del tutto nuove: esse erano già state sostenute da Keplero, che aveva però immaginato il problema solamente in due dimensioni.

Procedendo in questo modo a ritroso, Russo ci ricorda che la legge dell'inverso dei quadrati era già stata esposta nel XIII secolo da Ruggero Bacone, che l'aveva illustrata con la stessa analogia tra forza gravitazionale e propagazione della luce. In conclusione la conoscenza della dipendenza della forza gravitazionale dalla distanza aveva preceduto non solo ogni connessione con le leggi di Keplero, ma anche l'enunciato del secondo principio della dinamica. In altre parole l'andamento con la distanza della forza gravitazionale era già noto non solo prima che fosse utilizzato per spiegare qualsiasi fenomeno, ma anche prima che si stabilisse cosa dovesse veramente intendersi con "forza". Tale sviluppo delle idee diventa comprensibile se si ammette che Newton avesse ragione nel considerare la legge molto antica, anche se evidentemente stava esagerando nel risalire a Pitagora.

Newton viene oggi considerato il precursore della scienza moderna, tuttavia la sua scienza, nonostante la sua potenziale superiorità, dal punto di vista metodologico si può considerare inferiore a quella antica.
Nel corso della storia non era mai stata messa in dubbio l'essenzialità delle conoscenze antiche, anzi l'ammirazione per la scienza antica era rimasta invariata nel corso dei secoli ed era rinata in modo particolare nel corso del XIII secolo, grazie a Ruggero Bacone, conservandosi fino all'epoca di Galileo e infine Newton.
Nel Settecento però accadde qualcosa di totalmente nuovo: per la prima volta si era riusciti a costruire delle teorie coerenti, senza basarsi in modo essenziale su antiche fonti spesso mal comprese. Di conseguenza la scienza europea, convinta di poter finalmente progredire da sola, cominciò a rigettare l'antica cultura da cui era nata a rimuoverne il ricordo.
Fu in questo modo che ci convincemmo che la pneumatica fosse nata con Torricelli, lo stesso momento in cui la teoria eliocentrica, fino a quel momento legata al nome di Aristarco, divenne la teoria copernicana. La storia millenaria di riflessioni sulla gravitazione venne quasi del tutto cancellata, facendo sì che tale teoria sembrasse un lampo di genio di Newton. Tale atteggiamento si identificava perfettamente con la storia di Newton e la mela, leggenda diffusa da Voltaire, violento attivista nella rimozione del passato. Newton divenne così l'etichetta di un incredibile numero di idee.
In questo modo per accreditare la nuova immagine dello sviluppo fu necessario dimenticare il ruolo essenziale di intermediari tra l'antica cultura e la civiltà moderna, fu addirittura necessario occultare alcuni scritti di Newton, nei quali diverse idee ormai accreditategli come un parto improvviso del suo genio, venivano da lui stesso attribuite a Pitagora o agli Egizi.

Newton rappresenta una delle più brillanti menti di tutti i tempi, ma, nonostante il valore del suo genio sia del tutto indiscutibile, non bisogna dimenticare che i suoi studi e le sue scoperte non furono il frutto della sua unica mente, bensì quello di numerosissimi scienziati, che prima, dopo e con lui, posero le basi per la scienza moderna.

Bibliografia

[1] R. Dugas, *A history of mechanics*, Dover publications, 1988.

[2] C. Truesdell, *Essays in the history of mechanics*, Springer-Verlag, 1968.

[3] L.Russo, *La rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli, 1996.

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va al professor Graffi, per la sua simpatia e gentilezza, e ovviamente per la sua disponibilità, grazie.
A Tommaso, che riesce sempre a farmi sorridere, grazie per la pazienza e l'amore con cui sei sempre al mio fianco.
Alla mia famiglia e agli amici della mia città che mi sostengono ogni giorno, grazie di cuore.
Grazie a Chiara, Giulia, Lorenzo e Stefano: ho cominciato questo percorso chiamandovi colleghi, oggi invece vi lascio come amici.
Infine un grazie a tutti coloro che non hanno mai dubitato, nemmeno per un istante, che ce l'avrei fatta.