

Newton e le cause del moto

- a) Principio d'inerzia
- b) Principio di relatività
- c) Spazio e tempo assoluti
- d) $F=ma$
- e) Gravitazione universale
- f) Forza peso e legge di caduta
- g) Esperienza di Atwood
- h) Moto dei satelliti
- i) Principio di azione e reazione
- l) Esperienza del secchio
- m) *Hypotheses non fingo*

Newton Percorso Storico

Nel 1642, nello stesso anno in cui muore Galileo, nasce in Inghilterra Isaac **Newton**, uno scienziato la cui fama sarà almeno uguale a quella del grande italiano. Newton dà un grande contributo sia alla **Meccanica** che all'**Ottica** e dà origine a due diverse tradizioni scientifiche: una maggiormente matematizzata (meccanica razionale, astronomia, idrodinamica) ed una prevalentemente sperimentale (ottica, elettricità, magnetismo, termologia).

In meccanica Newton riprende i problemi studiati da Galileo, e li affronta in una nuova prospettiva: non vuole solo descrivere i moti ma vuole studiare le cause di questi stessi moti. Particolare attenzione viene quindi dedicata allo studio delle forze che modificano lo stato di quiete o di moto dei corpi. Per Newton tutte le traiettorie sono il risultato di due forze contrapposte: la vis insita che tende a conservare lo stato di moto di un corpo e la vis impressa che tende invece a modificarlo.

Newton accetta da Galileo il principio d'inerzia (prima assioma) e quindi l'idea che lo stato naturale dei corpi sia il moto (e non la quiete come sosteneva Aristotele): i corpi possono essere in moto anche senza che su di essi agiscano delle forze.

Entra a far parte della meccanica newtoniana anche un altro contributo di Galileo, strettamente legato al principio d'inerzia: il principio di relatività.

La concezione dello spazio e del tempo é invece nuova. Da un'approfondita analisi del principio di inerzia deriva infatti, paradossalmente, un'esigenza che contrasta con il principio di relatività: quella di avere un

riferimento privilegiato. Newton assume che lo spazio ed il tempo siano assoluti, immutabili, eterni, infiniti, indipendenti da ogni oggetto materiale.

Il secondo assioma di Newton ci fornisce una definizione del concetto di forza: in questa nuova concezione le forze non sono più legate alla velocità dei corpi (come in Aristotele) ma alla variazione della velocità, cioè all'accelerazione.

Proseguendo nella sua geniale costruzione Newton propone un modello fisico per le forze, in particolare per quelle gravitazionali: elaborando le leggi di Keplero perviene alla legge della gravitazione universale, che unifica la spiegazione del moto dei corpi celesti e della caduta dei gravi sulla Terra.

Ora la legge di caduta di Galileo viene inquadrata in un contesto più ampio: tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione perché subiscono due effetti contrapposti che si compensano. Da una parte c'è la forza di gravità, che è proporzionale alla massa (gravitazionale) del corpo, dall'altra la forza di inerzia che pure è proporzionale alla massa (inerziale) del corpo. La massa inerziale e quella gravitazionale sono uguali e quindi i corpi pesanti se da una parte sono attirati maggiormente dalla Terra, dall'altra resistono anche maggiormente a modificare il proprio stato.

E' interessante notare che la teoria di Newton consente di costruire nuovi apparecchi per la verifica della legge di caduta: al piano inclinato si affianca la bilancia di Atwood, basata appunto sulla distinzione tra massa inerziale e massa gravitazionale.

Il moto dei satelliti offre un'illustrazione delle idee di Newton: la traiettoria della luna viene vista come una perenne caduta verso la Terra, associata ad una forza inerziale tangenziale. Nell'ambito delle proprie concezioni Newton riuscì anche ad ipotizzare la messa in orbita di satelliti artificiali.

Un terzo assioma fondamentale della teoria di Newton è il principio di azione e reazione, un ulteriore pilastro della concezione meccanica.

La soluzione Newtoniana dei problemi della meccanica è universalmente ritenuta una delle sintesi più geniali prodotte dal pensiero umano: per due secoli essa ha dominato incontrastata in fisica ed ha fornito un modello di scientificità a molte altre scienze, nonché uno spunto a nuove concezioni filosofiche. Le prime profonde critiche sono venute alla fine dell'Ottocento e riguardavano l'idea di spazio assoluto. Mach nella sua discussione dell'esperienza del secchio proposta da Newton sottolinea la priorità dei moti relativi. Queste critiche ebbero una profonda influenza sul pensiero di Einstein.

La teoria di Newton é molto sofisticata e piena di ipotesi. Come dobbiamo allora interpretare la sua famosa affermazione: " Hypotheses non fingo" (non faccio ipotesi)?

Approfondimento Storico

A) Principio di inerzia

Newton sviluppò la concezione di Galileo (ed anche di Cartesio) dell'inerzia e la inserì in un nuovo schema concettuale. Fin dalle prime pagine della sua opera del 1687 *Principi matematici della Filosofia Naturale* si trovano le definizioni di due "forze" o "tendenze" con caratteristiche differenti, la **forza insita** (o forza d'inerzia) che tende a mantenere lo stato di quiete o di moto uniforme del corpo e la **forza impressa** che tende invece a modificare tale stato.

Vediamo dapprima come viene definita la forza insita:

Def III

La forza insita (vis insita) della materia é la sua disposizione a resistere; per cui ciascun corpo, per quanto sta in esso, persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Questa forza é sempre proporzionale al corpo, né differisce in alcunché dall'inerzia della massa altrimenti che per il modo di concepirla. A causa dell'inerzia della materia, accade che ogni corpo é rimosso con difficoltà dal suo stato di quiete o di moto. Per cui anche la forza insita può essere chiamata col nome molto espressivo di forza d'inerzia.....

Questa definizione é necessaria per comprendere la prima legge del moto

Legge I

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

I proiettili perseverano nei propri moti salvo che siano rallentati dalla resistenza dell'aria, e sono attratti verso il basso dalla forza di gravità. Una trottola, le cui parti, a causa della coesione, di continuo si deviano l'un l'altra dal movimento rettilineo, non cessa di ruotare, salvo che venga rallentata dalla resistenza dell'aria. I corpi più grandi dei pianeti e delle comete conservano più a lungo i propri moti sia progressivi che circolari effettuati in spazi meno resistenti.

B) Principio di relatività

Il principio d'inerzia é strettamente connesso a quello di relatività: già Galileo aveva ipotizzato che un corpo in moto continua nel suo stato di moto se non é perturbato. Pertanto Galileo, per primo, asseriva che i corpi possono restare in movimento anche senza l'azione diretta di cause, ma per inerzia (ovviamente in assenza di attriti, resistenza dell'aria e di altre perturbazioni). Galileo aveva anche legato questo principio di inerzia, una grande novità rispetto alla tradizione aristotelica (per Aristotele i corpi, esaurita la spinta iniziale, dovevano fermarsi a meno che su di essi non agissero a contatto delle forze), al **principio di relatività**: se corpi possono essere in moto senza cause che agiscono su di essi, dall'interno di questi corpi in moto come facciamo a sapere che siamo in moto? Esempio: su un treno in moto rettilineo uniforme io non sperimento nessuna forza dovuta al moto, non mi accorgo (se le tapparelle dei finestrini sono abbassate) di essere in moto. Se faccio delle esperienze di fisica ottengo gli stessi risultati che posso ottenere in un laboratorio fermo sulla terra. In altre parole: dato che si può avere un moto senza forze applicate (moto inerziale) le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali (quelli fermi o in moto rettilineo uniforme).

Pertanto Newton inserisce nella propria meccanica non solo il principio di inerzia ma anche quello della relatività galileiana;

C) Spazio e tempo assoluti

L'affermazione del principio d'inerzia che a noi oggi sembra semplice, sembra scontata, in realtà nasconde tutta una serie di insidie concettuali. Io mi soffermerò solamente sulla prima: cosa vuol dire rettilineo? Come si fa a dire che un moto é rettilineo, rispetto a quale sistema di riferimento lo misuriamo? Si può vedere, se un uomo che corre con velocità costante e lascia cadere una palla), che rispetto al sistema di riferimento esterno la traiettoria della palla é una parabola, invece in un sistema di riferimento solidale all'uomo che corre, la traiettoria della palla é una retta verticale. Evidentemente é difficile stabilire se il moto é rettilineo o meno. Ancora un esempio: se tracciamo una riga su un disco in movimento, una riga che segua un andamento rettilineo rispetto ad un sistema di riferimento esterno rigido come può essere una squadra, sul disco non verrà disegnata una retta, ma una spezzata. Abbiamo di nuovo il problema: rispetto a che sistema definiamo il nostro moto come rettilineo? Eppure nella definizione del principio di inerzia parliamo di moto rettilineo. Newton, evidentemente, si pose questo problema e lo risolse dicendo: "*noi definiamo il moto rettilineo rispetto allo*

spazio assoluto", perché se lo definissimo rispetto ad un sistema solidale alla terra potremmo scoprire che anche la terra é in movimento, se lo definissimo rispetto ad un sistema connesso con il sole potremmo scoprire, come poi é stato scoperto, che anche il sole é in movimento, lo stesso per le stelle fisse e così via; qualunque riferimento empirico potrebbe essere, in definitiva, un sistema in movimento. Quindi Newton introdusse un riferimento privilegiato, un riferimento assoluto.

Dal principio di inerzia consegue un **paradosso**: da una parte un principio di relatività e dall'altra un riferimento privilegiato; Abbiamo visto infatti che partendo dal principio di inerzia Galileo pervenne a spiegare i moti relativi immediatamente: se un corpo é in movimento senza che su di esso siano applicate delle forze, evidentemente su questo sistema in movimento non si sperimenta nessuna forza, se non si sperimenta nessuna forza non si può dire di essere in movimento. Quindi tutte le leggi della fisica che si ottengono nel sistema in moto sono uguali a quelle che si ottengono facendo esperimenti sulla terra ferma. Se si ammette il principio di inerzia si ammette dunque anche un principio di relatività. Viceversa se ammettiamo il principio di inerzia, abbiamo bisogno di uno **spazio assoluto** per definire il moto come rettilineo, abbiamo bisogno del **tempo assoluto** per dire che il moto é uniforme e così via.

Newton introdusse dunque questi concetti nella fisica; ciò rappresentava una grande novità sia perché fino ad allora si era parlato di spazio e tempo solo in riferimento alle posizioni ed ai movimenti degli oggetti (spazio e tempo relazionali), sia perché questi nuovi concetti non erano il risultato di esperimenti ma di una riformulazione teorica.

Le parole utilizzate da Newton sono rimaste famose.

D) $F=ma$

Abbiamo detto che Newton spiega i movimenti dei corpi ipotizzando due forze contrastanti: vediamo dunque come definisce la forza impressa:

Def IV

...Una forza impressa è un'azione sul corpo al fine di mutare il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

Questa forza consiste nell'azione in quanto tale, e, cessata l'azione, non permane nel corpo. Infatti un corpo persevera in ciascun nuovo stato per la sola

forza di inerzia. La forza impressa ha varie origini: l'urto, la pressione, e la forza centripeta.

Legge II

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

Posto che una qualche forza generi un movimento qualsiasi, una forza doppia ne produrrà uno doppio, e una tripla uno triplo, sia che sia stata impressa di colpo e in una sola volta, sia gradatamente ed in tempi successivi. E questo moto (poiché è sempre determinato lungo la stessa direzione della forza generatrice) se è concorde e se il corpo era già mosso, viene aggiunto al moto di quello; sottratto se contrario, oppure aggiunto solo in parte se obliquo, così da produrre un nuovo movimento composto dalla determinazione di entrambi.

Questa é la famosa legge che poi sarà codificata nella formula

$$F=ma$$

La massa m che compare in questa formula é una **massa inerziale**, cioè rappresenta una caratteristica dei corpi che si oppone al moto. Per capire la definizione di massa inerziale si può fare l'esperienza seguente: diamo con un martello un impulso ad una sfera posta su un piano. A seconda della massa della sfera, essa acquisterà una differente accelerazione, a parità di forza agente nell'unità di tempo se la massa più grande l'accelerazione sarà minore.

E) Gravitazione Universale

Dobbiamo adesso determinare l'espressione delle forze impresse, individuare le cause dell'accelerazione: cioè capire che cosa si possa sostituire alla F dell'equazione.

Qui Newton ottiene un altro risultato di grande rilievo: elaborando le leggi sperimentali di Keplero arriva a formulare la legge della **gravitazione universale**:

$$F=K\frac{mM}{R^2}$$

Le masse che compaiono nella formula non sono più delle masse inerziali che si oppongono al moto: esse sono delle masse gravitazionali, che causano il moto. Tanto maggiori le masse tanto maggiori le forze impresse. Con questa formula Newton introduce una straordinaria concezione fisica, che sarà oggetto di accese discussioni: l'**azione a distanza**. Infatti egli suppone, in contrasto con molti suoi contemporanei che l'accusarono di reintrodurre in fisica agenti

misteriosi, le qualità occulte, che i corpi possano agire su altri corpi senza un contatto, anche a grandissime distanze. Inoltre non compare il tempo nella legge di gravitazione, il che implica che le forze newtoniane si trasmettono con velocità infinita, istantaneamente. La meccanica si sviluppò sulla base della concezione newtoniana di azione istantanea a distanza.

F) Forza peso e legge di caduta

Esaminiamo dapprima il caso di un corpo che cade sulla superficie terrestre, cioè che venga attirato dalla Terra. M sarà la massa della Terra e R la distanza del centro della terra dal corpo in questione (un altro risultato di Newton: supporre tutta la massa concentrata al centro della sfera). Per tutti i corpi sulla superficie terrestre M ed R non variano e quindi possiamo definire una forza impressa di particolare importanza: la **forza peso**

$$P=mg$$

ove $g=K M/RR$

Pertanto il peso di un corpo è maggiore quanto maggiore è la sua massa. Questo può essere facilmente verificato con una bilancia.

Ma come fa Newton a spiegare quello che Galileo aveva descritto e cioè che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione? Se i corpi di massa maggiore pesano di più non dovrebbero cadere più velocemente, come pensava Aristotele? Newton spiega **la caduta dei gravi come il risultato di due effetti contrapposti**, quello della vis insita e quello della vis impressa: la massa inerziale tende a resistere all'azione prodotta dalla massa gravitazionale. C'è una forza impressa che agisce, ma c'è anche una forza d'inerzia che resiste. L'aspetto notevole di quest'approccio è che Newton ricava "sperimentalmente" che per ogni corpo le due masse sono uguali.

Newton, "Principi matematici"

...La caduta di tutti i gravi sulla Terra (tenuto conto dell'ineguale ritardo che nasce dalla scarsissima resistenza dell'aria) avviene in tempi uguali, come già altri osservarono; ed è possibile notare con grande precisione l'uguaglianza di tali tempi nei pendoli.

Ho tentato l'esperimento con pendoli d'oro, d'argento, di piombo, di vetro, di sabbia, di sale, di legno, d'acqua e di frumento. Preparavo due recipienti di

legno, rotondi ed uguali. Riempivo l'uno di legno, e ell'altro centro di oscillazione sospendevo (nella misura del possibile esattamente? un uguale peso d'oro. I recipienti, che pendevano da fili uguali, lunghi undici piedi, costituivano i pendoli, assolutamente uguali quanto al peso, alla figura e alla resistenza dell'aria; ed impresse uguali oscillazioni, una volta posti uno vicino all'altro, andavano e tornavano insieme per lunghissimo tempo.

Perciò, la quantità di materia nell'oro (per i coroll. 1 e 6 della prop. XXIV del libro II) stava alla quantità di materia nel legno, come l'azione della forza motrice in tutto l'oro alla medesima azione in tutto il legno; ossia, come il peso dell'uno stava al peso dell'altro. E così per i rimanenti.

Mediante questi esperimenti potei chiaramente apprendere che la differenza di materia in corpi dello stesso peso è minore della millesima parte di tutta la materia.

Queste misure sono state portate avanti fino ai nostri giorni. Tutte confermano che non c'è nessuna differenza quantitativa tra la massa inerziale e la massa gravitazionale delle varie sostanze. Tuttavia le due masse costituiscono, da un punto di vista teorico, concetti differenti all'interno del sistema newtoniano e, quindi, il fatto che esse risultino espresse dallo stesso valore è puramente accidentale.

Pertanto quanto più la massa gravitazionale di un determinato corpo tende ad accelerare il corpo, tanto più la massa gravitazionale dello stesso corpo tenderà a resistere al movimento ed il risultato é che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione.

$$\begin{aligned} F &= m_i a = P = m_g g \\ \text{dato che } m_i &= m_g \\ a &= g \end{aligned}$$

Il risultato di Galileo viene qui interpretato in una concezione dinamica, cioè con delle ipotesi sulle cause del moto.

G) Esperienze di Atwood

Una verifica della legge di caduta condotta in un contesto teorico newtoniano é quella di **Atwood**.

E' proprio in questo contesto teorico che G. Atwood progetta un apparecchio, ben diverso dai piani inclinati di Galileo, per sperimentare sui corpi in caduta.

L'idea fondamentale di Atwood è quella di sospendere due corpi uguali alle estremità di un filo poggiato su una carrucola. I due corpi si trovano in equilibrio poiché le Forze peso (forze impresse) agiscono in versi opposti. Se però aggiungiamo un piccolo peso ad uno dei due corpi la situazione cambia radicalmente ed i corpi cominceranno a muoversi. L'unica forza motrice è quella del peso aggiuntivo, di massa m , cioè:

$$P = mg$$

mentre la massa inerte è quella relativa alle masse inerziali dei 3 corpi del sistema. Pertanto dalla seconda legge di Newton abbiamo $mg = (2M + m) a$, da cui

$$a = \frac{m}{2M + m} g$$

L'accelerazione misurata è pertanto ridotta rispetto a quella di gravità g di un fattore

$$\frac{m}{2M + m}$$

il che evidentemente semplifica molto le misure.

Riportiamo la descrizione della Macchina di Atwood come viene presentata in un famoso testo universitario del 1843.

Da: Mossotti, Lezioni elementari di Fisica Matematica.

...Ora questi esperimenti si eseguono più comodamente con un apparecchio, che Giorgio Atwood imaginò nel secolo passato, e che perciò si chiama la macchina di Atwood.

L'essenziale di questa macchina consiste in una carrucola il cui asse orizzontale è sostenuto da quattro rotelle mobili di un tribometro per diminuire lo sfregamento. (Vedasi la Fig. 3.8)

Fig. 3-8

Nella gola di questa carrucola passa un filo di seta molto sottile tirato nelle sue estremità da due pesi eguali. In questo stato, trascurando il peso del filo e gli effetti dello sfregamento, che sono ben poco sensibili, i due pesi debbono farsi equilibrio e restare immobili a qualunque altezza si trovino posti, e comunicando un movimento ad uno di essi con un piccolo urto, devono l'uno discendere e l'altro ascendere con movimento uniforme.

Questi sperimenti preparatorii servono per verificare se la macchina opera bene, cioè a dire, se i pesi sono eguali, e se lo sfregamento è poco sensibile. Per eseguirli con precisione, dal lato del corpo che discende vi è un'asta ben divisa sopra cui si possono valutare gli spazii che il corpo ha percorsi alla fine di un tempo qualunque, ed un pendolo per contare i secondi.

Supponiamo ora di aggregare ad uno dei due detti corpi in equilibrio alle estremità del filo, un piccolo corpo addizionale il cui peso non sia che una porzione del peso totale di quelli. Questo peso addizionale, non potendo discendere senza muovere gli altri due congiuntamente, costituisce una forza motrice che si riparte uniformemente fra tutte le particelle della materia che compongono il sistema dei tre corpi.

Denotando con M la massa di uno dei corpi maggiori, con m la massa del corpo minore aggiunto, la forza acceleratrice della gravità, si troverà attenuata nel movimento del sistema dei tre corpi nella ragione di $m:(2M + m)$, per conseguenza gli spazii corsi e le velocità acquistate staranno a quelle di un corpo che cade liberamente, in un tempo eguale, nella stessa ragione.

Gli esperimenti che si facciano con la macchina d'Atwood rappresenteranno dunque nella stessa proporzione ma in una scala meno veloce, nella quale la resistenza dell'aria avrà poco effetto, ciò che la natura opera in una scala più rapida nella caduta libera de' corpi, e saranno per conseguenza molto proprii per mostrarci il modo l'agire della gravità.

Per facilitare l'esecuzione di questi sperimenti si applica comunemente al pendolo un grilletto che sostiene quello dei pesi grandi a cui è applicato il piccolo peso addizionale all'altezza dove cominciano le divisioni dell'asta.

Subito che la sfera arriva ad un punto determinato del quadrante, per esempio quello segnato 60° , il colpo stesso del pendolo pone in libertà il grilletto ed il sistema si pone in movimento, di modo che non abbisogna altro che leggere sopra il quadrante

secondi passati dal 60° sino al punto segnato della sfera, allorché i corpi sono giunti al termine ove il movimento s'arresta. Per poter assegnare con più precisione l'istante in cui il movimento è arrestato, si fissa sull'asta delle divisioni, all'altezza in cui si vuole che il movimento termini, un piccolo piano orizzontale contro il quale la massa M che discende va ad urtare, e col rumor dell'urto ci avvisi del termine della caduta.

Se si desidera di conoscere la velocità dei corpi del sistema in un punto qualunque della caduta, o come si suol dire la velocità acquistata, si fissa nella divisione corrispondente dell'asta un anello piano, e si dà al peso addizionale la forma di una lamina oblunga che si sovrappone al peso grande M e gli sporge fuori dai due lati. Quando il peso addizionale arriva al livello dell'anello, non potendo passare per la sua lunghezza, viene arrestato e rimane sopra l'anello, e non proseguono il loro movimento che i due pesi grandi, che equilibrandosi reciprocamente, sono, per così dire, insensibili all'azione della gravità, e solo continuano a muoversi per la loro inerzia in virtù della velocità acquistata, che è appunto quella che si vuole riconoscere. Eseguendo questi esperimenti si trova:

- 1. Che fissando il piano orizzontale, sopra cui va a fermarsi il gran corpo col suo addizionale in distanze tali, dal punto di partenza, che stiano come i numeri 1, 4, 9, 16 ec. quei corpi arrivano ad urtare il piano alla fine di tempi che crescono come i numeri 1, 2, 3, 4 ec., dal che risulta che gli spazi aumentano come i quadrati dei tempi, nei quali dura il movimento.*
- 2. Facendo che il peso addizionale resti sospeso sopra l'anello in un punto qualunque della sua discesa, il movimento degli altri due pesi continua con una velocità uniforme tale che con essa velocità percorrono uno discendendo l'altro ascendendo, uno spazio doppio di quello che hanno trascorso unitamente al peso addizionale.*

Le proprietà del movimento dei corpi cadenti che questi esperimenti ci danno a conoscere, appartengono al movimento uniformemente accelerato, ed una sola di esse basterebbe per caratterizzarlo.

Ma dalla Meccanica razionale si sa che la forza acceleratrice che produce il movimento uniformemente accelerato è una forza costante, dunque la gravità che produce un movimento di questa specie è una forza acceleratrice che, nelle vicinanze della superficie della terra, può considerarsi come costante.

Denotando con g la velocità che la gravità può imprimere a un corpo cadente nell'unità di tempo, per esempio in un secondo, e con v e s la velocità acquistata e lo spazio corso alla fine del tempo t qualunque; per le proprietà del movimento uniformemente accelerato, che abbiamo visto essere quello dei corpi che cadono si avrà

$$(1) \quad v = gt, \quad (2) \quad s = g \frac{t^2}{2}$$

Se si elimina il tempo t fra queste due equazioni si ottiene

$$(3) \quad v = \sqrt{2gs}$$

così il corpo acquista cadendo da un'altezza s una velocità che è proporzionale alla radice quadrata di quest'altezza. In Meccanica si fa spesso uso nell'indicare una velocità qualunque v , della frase velocità dovuta all'altezza s .

La quantità g che denota la velocità che acquista un corpo cadendo nell'unità di tempo, e proporzionale alla gravità, e si prende come si è spiegato altrove per misura di questa forza acceleratrice. Il valore della gravità si può quindi dedurre dagli esperimenti che abbiamo accennati, per esempio dal secondo, aumentando la velocità acquistata nell'unità di tempo in ragione della somma delle tre masse $2M + m$ alla massa m del peso addizionale. Ma in questo modo non si dedurrebbe che un valore poco esatto, perché quantunque gli effetti dello sfregamento e della resistenza dell'aria siano minimi in questi esperimenti, ciò nonostante venendo essi pure ad essere aumentati nella ragione suddetta possono produrre delle differenze sensibili.

Vedremo in seguito che il valore della gravità, o secondo i principii stabiliti, la velocità che essa può imprimere ad un corpo che cade nel vuoto in un secondo sessagesimale di tempo al livello del mare è per Corfù eguale a 9m,80126, l'unità lineare essendo il metro legale.

H) Moto dei satelliti

La legge della gravitazione ebbe molto successo, indipendentemente dalle difficoltà concettuali, perché spiegava con accuratezza una grande quantità di fenomeni, ed evidentemente anche quelli del movimento dei pianeti.

Viene così infranta ancora una volta la tradizione aristotelica: il mondo terrestre e quello celeste sono soggetti alle stesse leggi.

E' interessante che anche il moto dei pianeti sia spiegato come risultante dagli effetti contrapposti della legge di inerzia e di quella di gravità: Newton nello spiegare il **moto dei pianeti** discute anche delle traiettorie di speciali proiettili, quelli che oggi chiamiamo **satelliti artificiali**:

Fig. Newton

Nello stesso modo il moto della luna viene spiegato come una continua caduta verso la Terra.

v **Fig.**

I) Principio di azione e reazione

La terza legge del moto di Newton é il **principio di azione e reazione**

L) Esperienza del secchio

Ma la teoria di Newton, per quanto straordinaria, non era certamente perfetta: restava ad esempio il contrasto tra principio di relatività e spazio assoluto. Newton lo risolse così: il principio di relatività vale per i sistemi inerziali, per i sistemi non inerziali invece occorre lo spazio assoluto per definire un sistema di riferimento per le forze (cosiddette inerziali) che vi compaiono.

Cerchiamo di spiegarci meglio: Newton asserì la necessità dello spazio e del tempo assoluti e la necessità di una netta distinzione tra sistemi inerziali, cioè tra sistemi in moto rettilineo uniforme, e sistemi non inerziali. la famosa seconda

legge del moto é una legge che vale solamente se riferita ad un sistema inerziale; se invece noi la riferuiamo ad un sistema non inerziale, ad esempio ad un sistema in rotazione, essa non vale piú. Infatti nei sistemi non inerziali esistono delle altre forze. E' un brutto gioco di parole: le forze che si chiamano inerziali sono quelle tipiche dei sistemi non inerziali. Per esempio se saliamo su una giostra possiamo immediatamente capire di essere in un sistema non inerziale perché avvertiamo una forza inerziale, nel caso specifico la forza centrifuga; quindi se siamo su un sistema rotante, le leggi della fisica sono diverse rispetto a quelle di un sistema non rotante.

Newton disse che lo spazio assoluto é il sistema di riferimento per queste forze inerziali. Tentò di dimostrarlo con la famosa **esperienza del secchio**. Appendiamo un secchio pieno d'acqua al soffitto e facciamo ruotare su stesso attorcigliando così la corda; arrestiamo l'operazione e poi apriamo le mani e lasciamo che il secchio si metta in rotazione nel verso opposto per effetto della torsione della corda; Newton considerò quattro momenti di questo processo: il primo é il momento in cui il secchio é fermo, la corda é attorcigliata, la superficie dell'acqua é piatta, cioè non c'è deformazione e non c'è neanche moto relativo tra acqua e secchio: sia il secchio che l'acqua nel secchio sono fermi. Nella seconda fase lasciamo che il secchio si metta a ruotare per effetto della torsione della corda: quando il moto del secchio ancora non é stato trasmesso all'acqua la superficie dell'acqua é ancora piatta; abbiamo un moto relativo però non abbiamo la deformazione. Nella terza fase un pò alla volta l'acqua si mette a ruotare e, ruotando, la superficie si deforma per effetto delle forze centrifughe, assumendo il tipo di configurazione indicato in **figura**:

A questo punto l'acqua ha la stessa velocità di rotazione del secchio per cui non c'è moto di rotazione del secchio per cui non c'è moto relativo tra acqua e secchio e, invece, c'è deformazione della superficie dell'acqua.

Infine nella quarta fase blocchiamo il secchio, ma l'acqua continuerà a ruotare, quindi c'è ancora una deformazione della superficie dell'acqua e c'è moto relativo perché il secchio, a questo punto, é fermo. Cosa ne ricaviamo? Ne ricaviamo che non possiamo stabilire una correlazione tra la deformazione della superficie dell'acqua ed il moto relativo, perché non abbiamo deformazione sia quando c'è che quando non c'è il moto relativo tra acqua e secchio.

Quindi, dice Newton, non possiamo riferire queste forze d'inerzia che causano la deformazione al moto relativo tra acqua e secchio: dobbiamo riferire queste forze allo spazio assoluto. Le potremmo riferire alla terra, ma vediamo che

anche la terra é schiacciata ai poli per effetto delle forze d'inerzia, anche il sistema solare presenta delle caratteristiche dovute alle forze d'inerzia e così via; Da qui la necessità dello spazio assoluto.

Quindi abbiamo da una parte il principio di relatività e dall'altra lo spazio assoluto. Questa é una contraddizione intrinseca al principio di inerzia alla quale Newton dà la soluzione che abbiamo esaminato: principio di relatività per i sistemi inerziali, spazio assoluto per i sistemi non inerziali. Lo sviluppo della fisica successiva si può anche interpretare come un dibattito tra coloro che ponevano l'accento sul principio di relatività e coloro che ponevano l'accento sul riferimento privilegiato. All'interno della meccanica la soluzione di Newton, che accettava il principio di relatività per il moto rettilineo uniforme e lo negava per i moti accelerati, ebbe molto successo.

M) *Hypotheses non fingo*

Potrà meravigliare, dopo aver sottolineato alcune importanti assunzioni teoriche fatte da Newton, la sua famosa frase: *Non faccio ipotesi*. Va ricordato però che qui Newton si riferiva alla richiesta fatta da alcuni contemporanei di una spiegazione della forza di gravità, spiegazione che Newton volle trascurare, accontentandosi di aver con le proprie leggi sulle cause del moto descritto correttamente i fenomeni.