Capitolo 7

Le tre leggi della dinamica

7.1 La dinamica

Dobbiamo ora affrontare lo studio delle cause che determinano il moto. In questo contesto diventano fondamentali i concetti di *inerzia,* di *forza* e di *massa,* di cui più avanti forniremo le precise definizioni. Per ora limitiamoci ad introdurre l'argomento dal punto di vista storico, spiegando come il problema della **dinamica** (dalla parola greca *dynamis*, che significa "forza") era stato affrontato dalla filosofia antica.

7.2 Il moto secondo Aristotele: il "finalismo"

Le osservazioni di Aristotele in merito alla *filosofia naturale* (la fisica di oggi) rimangono fuori dall'orizzonte di una qualsiasi discussione critica per quasi duemila anni. Purtroppo non sono pochi gli errori che tali osservazioni contengono. Vediamo di commentarne alcuni.

1) Per Aristotele, il mondo terrestre e quello celeste sono retti da regole diverse: in cielo il moto naturale è circolare uniforme, come quello dei pianeti. In Terra, invece, la situazione naturale è la "quiete": perché un corpo rimanga in moto con velocità costante, afferma il grande filosofo greco, occorre la *continua applicazione di una forza*. Proprio l'esperienza diretta che ognuno di noi può fare, anche nella vita di ogni giorno, sembrerebbe confermare questa osservazione… Per smuovere una automobile che si sia fermata sulla strada occorre imprimere una forza per tutto il tempo che si vuole mantenerla in moto con velocità costante: appena tale forza cessa, anche l'auto si ferma. Le barche a vela si muovono sull'acqua solo se c'è la forza del vento che le spinge: in caso contrario, nessun moto è effettivamente possibile …

2) Tutta la materia è suddivisa in quattro elementi fondamentali: aria, acqua, fuoco e terra. Ognuno di questi elementi ha il suo "luogo naturale" dove risiedere, che é il cielo per l'aria e il fuoco (elementi leggeri), ed è la Terra per quelli pesanti (acqua e terra). *Il moto naturale*, secondo Aristotele, nasconde quindi la seguente interpretazione *finalistica*: ogni elemento cerca di ritornare verso il suo **luogo naturale**. Per questo motivo, se lasciati liberi di muoversi, aria e fuoco tendono a salire verso l'alto (il cielo), mentre terra ed acqua si dirigono verso il basso (la Terra). Un sasso e una piuma, afferma inoltre Aristotele, cadono verso il basso con velocità diverse perché il primo contiene più "materia" del secondo e quindi ha un moto di ricongiungimento al suo luogo naturale che è più veloce dell'altro.

3) Esistono poi i cosiddetti *moti violenti*, come quello impresso alla freccia dall'arco. In questo caso il moto della freccia continua anche dopo l'istante in cui la corda dell'arco ha esercitato l'impulso iniziale perché il dardo, nel suo spostarsi in avanti fendendo l'aria, lascia alle sue spalle uno spazio in cui, non potendo esserci l'aria per la precedente presenza della freccia e non essendoci più nemmeno la freccia perché spostatasi in avanti, tenderebbe a formarsi il "vuoto". Ora, afferma Aristotele, poiché la natura ha orrore del vuoto (*horror vacui*) e cerca in ogni modo di evitarne la formazione, l'aria che circonda la freccia si sposta rapidamente a riempire lo spazio lasciato dal corpo in moto. Questo brusco spostamento d'aria evita la formazione del "vuoto" e tende a spingere la freccia in avanti imprimendogli una nuova ed ulteriore forza. Man mano che la freccia procede, il fenomeno si indebolisce, e la velocità dell'oggetto in volo rallenta fino a fermarsi…

Secondo Aristotele, quindi, la spiegazione del moto fa leva su tre concetti filosofici fondamentali:

1) la netta *separazione* tra il mondo celeste e quello terrestre
2) l'interpretazione *finalistica* per interpretare i "moti naturali"
3) la teoria dell'*horror vacui* per spiegare i cosiddetti "moti violenti".

Completamente diverso sarà l'approccio di Galileo Galilei allo stesso problema.

7.3 Il moto secondo Galileo: la "legge d'inerzia"

Abbiamo già visto come la figura di Galileo Galilei sia fondamentale per la storia della Scienza e della fisica in particolare. A lui dobbiamo le conoscenze di cinematica, l'intuizione del moto parabolico dei gravi, la scoperta dell'isocronismo del pendolo, la conferma del modello copernicano dell'universo ottenuta attraverso numerose scoperte astronomiche con il cannocchiale, l'esplicitazione del metodo sperimentale come prassi per il vero operare scientifico e, in ultima analisi, la nascita della stessa Scienza moderna.

Anche nel campo della dinamica Galileo porta il suo originale contributo. Le sue considerazioni muovono da precise osservazioni di tipo sperimentale. Pensiamo ad un corpo che possa scendere da un piano inclinato a partire da una quota H e sia costretto a risalire lungo un secondo piano inclinato e chiediamoci quale quota finale potrà raggiungere. L'esperienza mostra che la quota finale sarà leggermente inferiore di quella iniziale H. Il motivo di questa discrepanza, osserva lo scienziato pisano, è da imputarsi alla presenza di **attriti** nei punti di contatto tra il piano e l'oggetto in moto. Questi attriti tendono a limitare il moto, ma possono essere fortemente ridotti levigando le superfici o prendendo opportuni accorgimenti tecnici (oggi si userebbero lubrificanti o rotaie a cuscinetti d'aria). Galileo può così osservare che, più si riduce l'attrito, più la quota d'arrivo si avvicina a quella di partenza H. *In assenza completa di attriti* (situazione impossibile da realizzare nella realtà), le due quote coinciderebbero perfettamente.

In tale situazione, qualunque sia l'inclinazione del secondo piano, l'oggetto ritorna sempre alla stessa quota di partenza. A questo punto Galileo si chiede cosa succederebbe se il secondo piano avesse inclinazione nulla. La sua risposta è la seguente: *l'oggetto continuerebbe a muoversi di moto rettilineo uniforme, cioè con velocità costante in modulo, direzione e verso.*

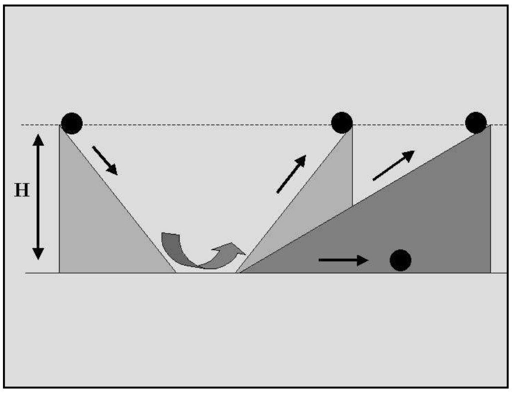


Fig. 1 *– Un oggetto in caduta da una quota H cerca di ritornare alla stessa quota di partenza, se non ci sono attriti. Se il secondo piano diventa orizzontale, il moto si trasforma in rettilineo uniforme. Galileo chiama "inerzia" la tendenza dei corpi a conservare il loro stato di moto.*

Questa tendenza dei corpi, in assenza di forze, a conservare lo stato di moto precedente viene definita da Galileo **inerzia**, e il *moto rettilineo uniforme* viene assunto dalla scienziato pisano <u>come il vero moto "naturale</u>".

La barca a vela, ad esempio, per poter muoversi a velocità costante deve vincere l'attrito con l'acqua, che si comporta come una forza contraria al moto: è solo per questo motivo che serve l'apporto costante della forza del vento. La differenza tra questa conclusione e quanto in precedenza affermato da Aristotele è enorme.

Anche il moto di caduta lungo la verticale di oggetti molto diversi tra loro (come un sasso o una piuma) è alterato dalla presenza dell'attrito dell'aria. Senza questa forza, il moto di caduta di tutti gli oggetti sarebbe lo stesso e il sasso e la piuma arriverebbero al suolo nello stesso istante e con la stessa velocità finale, se lasciati cadere dalla stessa quota di partenza.

E' interessante notare come Galileo cerchi di controbattere gli aristotelici facendo ricorso anche a discorsi di pura logica e non solo utilizzando indizi di natura sperimentale. Il ragionamento da lui proposto è il seguente: consideriamo due oggetti con un contenuto di "materia" (peso) profondamente diverso, P_1 e P_2. Secondo Aristotele il più pesante (supponiamo sia P_2) cadrà con velocità v_2 maggiore dell'altro. Pensiamo ora di "fondere" i due oggetti in un unico corpo di peso totale $P_1 + P_2$: il più leggero e lento rallenterà l'altro e quindi è ragionevole aspettarsi una velocità di caduta complessiva intermedia tra i due valori che contraddistinguevano il moto di ogni oggetto preso singolarmente. D'altra parte, l'oggetto unico in caduta ha ora un peso superiore a quello di ciascuno due corpi di partenza e quindi dovrebbe cadere più velocemente di ognuno di essi. Come si vede, dice Galileo, con la teoria aristotelica si arriva ad una contraddizione logica: un tale approccio al fenomeno del moto deve quindi essere completamente modificato.

Da questi esempi è evidente la grande capacità di Galileo di mettere in luce gli aspetti fondamentali di un fenomeno naturale, astraendolo da tutti gli elementi che tendono a mascherarlo. E' l'attrito, in questo caso, l'elemento da cui si deve prescindere. Solo eliminandolo si poteva portare alla luce il vero comportamento degli oggetti in moto e cogliere, così, le leggi fondamentali di natura.

Anche questa capacità di astrazione e di sintesi unificante di aspetti fenomenologici apparentemente non correlati (attrito dell'aria - attrito delle superfici a contatto), è alla base del metodo scientifico.

7.4 Il moto secondo Newton: le leggi della dinamica

Ci sono due domande che rimangono ancora senza risposta:

1) qual è la causa del moto ?

2) se applico delle forze ad un corpo, come si trasforma lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme descritto dalla legge d'inerzia ?

Le risposte necessitano di strumenti teorici molto più raffinati di quelli che si conoscevano al tempo di Galileo. E' merito di Newton (1642 – 1727) avere sviluppato un nuovo settore della matematica (*l'analisi infinitesimale*) e di averlo utilizzato per lo studio del moto. Newton è giustamente considerato il padre della dinamica non solo perché ne ha gettato le basi matematiche riassumendole in tre sole leggi nell'opera *Philosophiae Naturalis Principia Matematica* (pubblicata nel 1687), ma anche perché è suo merito aver individuato nelle **forze** *la vera causa del moto e di ogni successiva variazione del vettore velocità.*

I *Principia Mathematica* si aprono con alcune fondamentali definizioni, tra le quali quelle d'inerzia, di forza e di massa. Riprendendo quanto già affermato da Galileo, Newton definisce **inerzia** *la caratteristica di un corpo di opporsi ad azioni esterne che tendano a modificarne lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme*

Viene poi definita **forza** un ente fisico che, applicato ad un corpo, può indurre le seguenti modifiche:

1) *deformazione della struttura*

2) *modifica del vettore velocità* **v** *con cui il corpo era precedentemente in moto*

3) *trasformazione dello stato di quiete in uno di moto, e viceversa*

4) *conservazione dello stato di equilibrio.*

Le osservazioni precedenti di Galileo possono così essere riassunte da Newton in una semplice legge matematica, detta **principio d'inerzia**, che afferma:

Se su di un corpo non agiscono forze (oppure se la loro risultante **R** *è nulla), questo si muove di moto rettilineo uniforme oppure conserva il suo stato precedente di quiete.*

In simboli:

se $\mathbf{R} = 0$	allora $\mathbf{v} = \textit{costante},$	$\mathbf{a} = 0$

dove $\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \dots$ e dove, nel caso di quiete, il valore "costante" della velocità può anche essere nullo ($\mathbf{v} = 0$).

Il *principio d'inerzia di Galileo* prende anche nome di **primo principio della dinamica.** Nell'eseguire il calcolo della risultante **R** occorrerà tenere conto del *carattere vettoriale* della forza e, di conseguenza, usare la regola del parallelogramma o la somma dei vettori tramite componenti cartesiane.

La **massa**, invece, è definita da Newton come *la misura della quantità di materia che compone un corpo*, calcolabile come prodotto della sua densità ρ per il volume V da essa occupato. In formule :

$$m = \rho V$$

Ora, il fatto che la formula precedente introduca contemporaneamente due nuove grandezze fisiche, la *massa* e la *densità*, anziché definirle autonomamente, costituisce per molti un motivo di critica al procedimento newtoniano.

Un metodo alternativo, e meno discutibile, di introdurre il concetto di massa lo si ottiene facendo riferimento a quello di inerzia. Avendo in precedenza definito l'inerzia come "l'opposizione di un corpo ad azioni esterne che tendono a modificarne lo stato di quiete o di moto", si può definire la massa come la *misura dell'inerzia di un corpo*. La massa così definita è detta **massa inerziale**.

Per meglio chiarire le idee: tutti sanno che per spingere una automobile che si sia fermata (quindi per modificare il suo stato di quiete) occorre una forza maggiore che per fare l'operazione analoga con una bicicletta: questo avviene, in virtù di quanto appena affermato, perché i due oggetti hanno inerzie differenti, cioè masse diverse.

7.5 L'unità di misura della massa

La definizione di **massa** come *misura dell'inerzia di un corpo* non ci facilita il compito della scelta di una unità di misura operativamente valida e comoda. Da questo punto di vista é meglio rifarsi del concetto di **massa** come *quantità di materia*, anche se abbiamo visto i motivi per cui tale definizione è criticabile. Inoltre, non esistendo sulla Terra un oggetto o un fenomeno fisico che possano costituire un riferimento comodo e significativo per il campione unitario di massa, la scelta adottata sarà comunque arbitraria.

Nel 1889 l'*Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure* riunitosi a Sevres (vicino a Parigi) adotta come campione *la massa di un* dm^3 *di acqua distillata alla temperatura di 4 °C* (temperatura alla quale l'acqua raggiunge la sua densità massima) e lo battezza **kilogrammo** (kg).

E' evidente come tale campione sia tutt'altro che un campione ideale perché definito tramite il volume, e quindi in funzione del campione di lunghezza precedentemente adottato. Negli ultimi anni c'è stata una profonda riflessione su questa definizione: i fisici hanno cercato di introdurre una unità di misura più rigorosa della quantità di materia rifacendosi alle proprietà atomiche della stessa ed introducendo il concetto di **mole** (che per ora non affrontiamo).

7.6 La seconda legge della dinamica

Non abbiamo ancora risposto in modo soddisfacente alla seguente domanda:

Se applico delle forze ad un corpo, come si trasforma lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme previsto dalla legge d'inerzia ?

Ricordiamo che ogni variazione del vettore velocità, anche solo in modulo, direzione o verso, definisce una accelerazione. Consideriamo ora un corpo di massa m ed applichiamo ad esso una generica forza F diretta, per comodità, in direzione parallela a quella di moto. Notiamo con facilità che lo stato di quiete del corpo si trasforma in un <u>moto rettilineo uniformemente accelerato</u> con accelerazione a. Se ora allo stesso corpo applichiamo forze di intensità via via crescenti, (2F, 3F, 4F …) è immediato accorgersi sperimentalmente che anche l'accelerazione che anima il suo moto aumenta in modo direttamente proporzionale (diventando $2a$, $3a$ …).

Possiamo così concludere che *forza e accelerazione sono direttamente proporzionali*. Rimane ora da scoprire la costante di proporzionalità e a tal fine eseguiamo il seguente esperimento: consideriamo corpi di masse crescenti (2m, 3m, 4m …) ed applichiamo ad essi una forza tale da ottenere un moto con accelerazione costante *a* per ogni oggetto. E' facile rendersi conto che lo scopo è raggiunto se applico una forza di intensità crescente, caso per caso, uguale a 2F, 3F, 4F… Questo risultato, tra l'altro, è largamente atteso per quanto detto sull'inerzia nel paragrafo precedente. Non stupisce il fatto che, se le masse dei corpi considerati sono sempre più piccole (1/2 m, 1/3 m …) anche le forze da applicare per ottenere la stessa accelerazione *a* devono ridursi in modo proporzionale (1/2 F, 1/3 F,…).

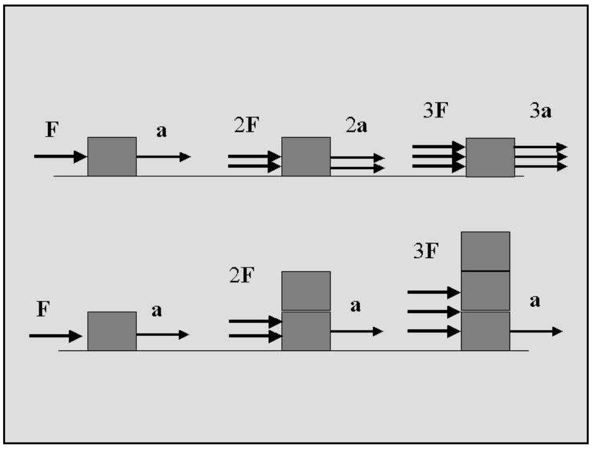


***Fig. 2** – Relazione sperimentale tra forza **F** ed accelerazione **a**, con massa costante (sopra) e variabile (sotto)*

Possiamo allora concludere che *forza ed accelerazione sono direttamente proporzionali e la costante di proporzionalità è la massa inerziale dell'oggetto considerato*. In formule, e ricordando che forza ed accelerazione sono vettori, posso scrivere:

$$\mathbf{F} = m\,\mathbf{a}$$

Questa espressione prende il nome di **seconda legge della dinamica.**

L'unità di misura della forza è il **newton** (simbolo N), definito come *quella intensità di forza che imprime ad una massa di 1 kg l'accelerazione di 1 m/s²*. Quindi:

$$1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \times 1\ \text{m/s}^2$$

Le dimensioni del *newton* sono $[M\ L\ T^{-2}]$

La seguente definizione suggerisce anche un metodo operativo per misurare l'intensità di una forza incognita: a tal fine è sufficiente conoscere la massa *m* del corpo in questione e la sua accelerazione **a**. Il prodotto $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$ consente di eseguire una **misura dinamica** dell'intensità della forza applicata.

Nota bene:

1) se le forze applicate all'oggetto sono molte, occorre considerarne la risultante **R**, ottenuta eseguendo la somma vettoriale di tutte le forze in gioco. La *seconda legge della dinamica* diventa allora

$$\mathbf{R} = m\,\mathbf{a}$$

2) se le forze in gioco non sono dirette lungo la direzione di moto bisognerà considerarne la componente lungo tale direzione. Si otterrà, di conseguenza, la componente dell'accelerazione lungo la stessa direzione. Nel caso in cui l'oggetto si muova lungo l'asse delle ascisse si deve quindi scrivere:

$$\mathbf{F}_x = m\,\mathbf{a}_x$$

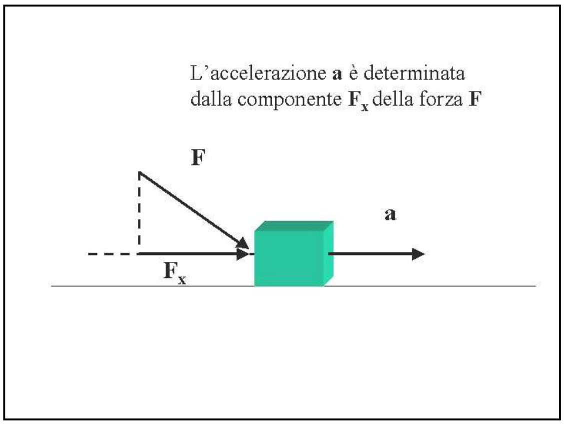


Fig - *Le forze vanno scomposte lungo la direzione di moto.*

7.7 Azione e reazione: la terza legge della dinamica

La Luna ruota attorno alla Terra perché il nostro pianeta la attrae con una forza **F** diretta lungo la congiungente i centri delle due sfere. Fu Newton il primo a capire che anche la Luna attrae la Terra, e con la stessa forza **F**, uguale in direzione e modulo, ma contraria nel verso.

Lo stesso avviene se, invece della Luna, prendiamo in considerazione un banale sasso o la più famosa mela di Newton: la mela è attratta dalla Terra con una forza **F** uguale e contraria a quella con cui essa attrae la Terra intera. Se poi noi vediamo che è la mela a cadere verso Terra e non la Terra a salire verso la mela, è solo perché le due masse in gioco sono profondamente diverse: le due forze, invece, sono perfettamente uguali in modulo e contrarie nel verso.

E ancora: se ci appoggiamo ad un muro, esercitiamo su di esso una forza **F** uguale e contraria a quella che il muro esercita su di noi. Di questa ultima forza ce ne accorgeremmo meglio se il terreno su cui poggiamo i piedi fosse perfettamente liscio e senza attrito: la nostra spinta verso il muro avrebbe come conseguenza quella di farci sentire sottoposti ad una forza diretta lontano dal muro che ci farebbe scivolare all'indietro.

Lo stesso atto del camminare è reso possibile dal terzo principio della dinamica: il nostro piede esercita una forza all'indietro sul terreno, e questo, grazie questa volta alla presenza dell'attrito senza il quale si scivolerebbe semplicemente, applica sul piede una forza uguale e contraria, cioè diretta in avanti: è questa la forza che ci permette di muoverci camminando. Anche nell'urto tra due corpi vale questo principio: le due forze in gioco durante il brevissimo istante dell'urto, che possiamo chiamare **azione** e **reazione** (è indifferente dire quale delle due sia l'azione e quale la reazione), sono sempre uguali e contrarie. Quindi, chiamati in generale A e B due corpi qualunque, vale il seguente principio:

La forza che un corpo A esercita sul corpo B è uguale e contraria a quella che il corpo B esercita sul corpo A.

In formule:

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$$

Consideriamo ora un urto frontale tra una bicicletta e un camion. La bicicletta ne esce completamente distrutta, mentre il camion, probabilmente, non riporta neanche un graffio. Nel linguaggio comune, sbagliando, molti affermerebbero che ciò avviene perché la bicicletta, nell'impatto, riceve "l'urto più forte". Eppure il principio di azione e reazione ci assicura che la forza esercitata dal camion sulla bicicletta ha una *intensità esattamente uguale* (e contraria in verso) a quella che la bicicletta esercita sul camion. Sembrerebbe esserci una contraddizione.

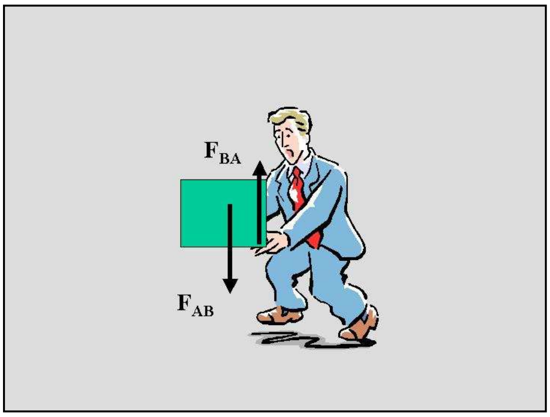
Il discorso si chiarisce se analizziamo meglio l'espressione "ricevere l'urto più forte". Essa, infatti, è profondamente ambigua perché tende a confondere la *forza* dell'impatto con quello che è il suo *effetto:* la variazione di velocità subita dai due corpi. Se riscrivo la seconda legge della dinamica in questo modo:

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$$

diventa più evidente il fatto che *l'effetto* dell'urto (l'accelerazione) sia determinato come conseguenza della *causa* dell'urto (la forza in gioco) in funzione del valore delle due masse che si vengono a scontrare.

Quando a due corpi sono applicate forze uguali, sono le masse dei corpi a determinare la differenza degli effetti.

La grande massa del camion determina una piccolissima variazione di velocità del mezzo, mentre la piccola massa della bicicletta subisce una grande accelerazione: il vettore velocità, in questo ultimo caso, sarà addirittura ribaltato e la bicicletta verrà lanciata a grande distanza dal punto dell'impatto, con conseguenze spesso disastrose. E' questa accelerazione maggiore a sottoporre la struttura della bicicletta ad uno sforzo maggiore e quindi causando un danno maggiore, suggerendo l'idea (errata) che il mezzo più leggero abbia subito l'urto più forte.



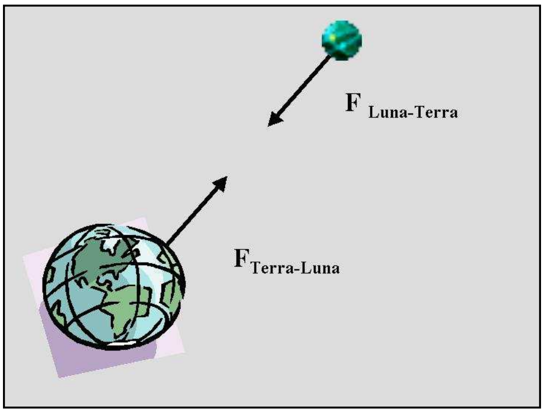


***Fig. 4** – Principio di azione e reazione: se un corpo A esercita una forza **F** sul corpo B, allora B esercita una forza uguale e contraria su A.*

7.8 Le tre leggi della dinamica

Come abbiamo visto, Newton riassume tutta la dinamica in tre semplici leggi che, per comodità, riportiamo qui di seguito:

PRIMA LEGGE: Principio d'inerzia (di Galileo)

Se su di un corpo non agiscono forze (oppure se la loro risultante è nulla) il corpo rimane in <u>quiete</u> (se precedentemente fermo), oppure si muove di <u>moto rettilineo uniforme</u> (se precedentemente in moto). In formule:

se $\mathbf{R} = 0$ allora $\mathbf{v} = \textit{costante}$, $\mathbf{a} = 0$

SECONDA LEGGE: Legge fondamentale della dinamica (di Newton)

Se su di un corpo di massa inerziale m *agiscono delle forze, questo si muove di moto accelerato secondo l'equazione*

$$\mathbf{F} = m\,\mathbf{a}$$

TERZA LEGGE: Principio di azione e reazione (di Newton)

Se il corpo A esercita una forza $\boldsymbol{F_{AB}}$ *su un corpo B, il secondo corpo esercita sul primo una forza* $\boldsymbol{F_{BA}}$ *uguale e contraria alla precedente. In formule:*

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$$

Note:

1) Si noti come la prima legge della dinamica sia un caso particolare della seconda: infatti, se le forze in gioco hanno risultante nulla, tale é anche l'accelerazione, e la velocità con cui si muove il corpo considerato non può che essere costante (quindi anche nulla, nel caso della quiete).

A rigore di logica, dunque, il principio d'inerzia non è una vera e propria legge indipendente, e la sua enunciazione esplicita potrebbe essere evitata. Non si deve pensare che Newton non si fosse accorto di ciò: il motivo per cui compare come legge a sé stante è prettamente di tipo filosofico. Il vero moto naturale, affermano Galileo e Newton, è quello che avviene senza forze ed è il *moto rettilineo uniforme*.

Ribadire ciò in una legge a parte assume una notevole valenza polemica e critica nei confronti degli aristotelici, ancora legati alle interpretazioni filosofiche dei fenomeni naturali come proposti duemila anni prima dal grande filosofo greco.

2) A proposito del principio di azione e reazione non è superfluo notare che le coppie di forze in gioco **non sono applicate allo stesso oggetto** (corpo A e corpo B). Se così fosse, infatti, la risultante delle forze applicate ad un qualunque corpo sarebbe sempre nulla e qualsiasi tipo di moto risulterebbe praticamente impossibile.

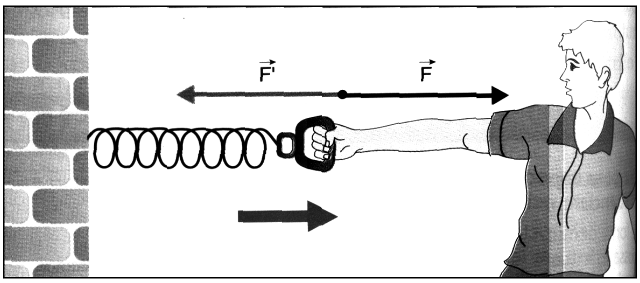


Fig. 5 – *L'azione e la reazione possono essere applicate allo stesso punto, ma non allo stesso corpo.* ***F*** *è applicata alla molla:* ***F'*** *è applicata alla mano del ragazzo. In caso contrario la risultante di tutte le forze sarebbe sempre nulla e ogni moto accelerato sarebbe impossibile da ottenere.*

7.9 I sistemi di riferimento inerziali

Il principio d'inerzia vale sempre, in ogni situazione?

L'esperienza mostra il contrario: non sono rare le situazioni della vita quotidiana in cui si notano oggetti mettersi in moto da fermi o cambiare velocità senza che esista una forza agente su di essi.

Proponiamo qualche esempio. Un treno sta viaggiando di moto rettilineo uniforme quando, improvvisamente, il macchinista è costretto a frenare bruscamente imponendo a tutto il convoglio una forte decelerazione. In tale situazione i passeggeri si sentono violentemente spinti in avanti ed anche eventuali oggetti posti su tavolini e ripiani si mettono a scivolare come se fossero spinti da una forza intensa ed improvvisa. Qualcosa di simile avviene quando, all'interno di una autovettura, affrontiamo a velocità sostenuta una curva: una "forza misteriosa" ci spinge verso il finestrino e i suoi effetti durano per tutto il tempo che impieghiamo a curvare.

Se ora ci proponiamo di cercare chi o che cosa ha esercitato su passeggeri ed oggetti tale effetto, non otteniamo alcun risultato. *Nessun ente fisico è la causa di tale forza*: anzi, possiamo concludere di essere in presenza di una accelerazione senza che questa sia stata indotta da alcuna forza reale. La forza responsabile del brusco movimento di persone e cose nel treno durante la frenata o sull'autovettura in curva di fatto non esiste, ma i suoi effetti in termini di accelerazione sono reali e facilmente misurabili!

In queste situazioni, quindi, il principio d'inerzia cessa di valere. Ma perché avviene ciò?

La risposta, in realtà, è molto semplice: il responsabile delle "forze" che si sperimentano nei due casi sopra descritti (e che si chiamano **forze apparenti**) è il sistema di riferimento in cui si trova l'osservatore. Sia il treno durante la frenata che l'autovettura mentre compie una curva rappresentano sistemi di riferimento in moto accelerato. In essi il principio d'inerzia cessa di valere e gli *oggetti risentono di accelerazioni anche se su di essi non è applicata nessuna forza.* Tali sistemi di riferimento, per questo motivo, sono detti **non inerziali** per distinguerli da quelli **inerziali** in cui le leggi della dinamica valgono così come le abbiamo enunciate in precedenza.

Una volta individuato un sistema di riferimento inerziale, è immediato concludere che ogni sistema di riferimento che si muova di moto rettilineo uniforme rispetto ad esso è a sua volta un sistema di riferimento inerziale. Ma esiste almeno un sistema di riferimento inerziale? La risposta non è semplice perché, in linea di principio, ogni oggetto sulla superficie della Terra è coinvolto nel moto di rotazione del nostro pianeta attorno al suo asse e attorno al Sole. Anche se gli effetti introdotti da tali moti sono molto piccoli e, in genere, trascurabili per la stragrande maggioranza di situazioni fisiche, un sistema di riferimento solidale con la Terra non può essere considerato un perfetto esempio di sistema inerziale.

Seguendo il ragionamento di Newton, possiamo scegliere le *stelle fisse* come sistema di riferimento inerziale per eccellenza: ogni sistema di riferimento fermo rispetto ad esse o in moto rettilineo uniforme sarà un riferimento inerziale.

Cosa succede alle leggi della dinamica nello studio del moto di oggetti che si muovono in sistemi di riferimento non inerziali ? Quasi nulla. Abbandonato il principio d'inerzia, basta riscrivere la seconda legge tenendo conto anche delle forze apparenti $\mathbf{F}_{app}$:

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}_{app} = m\,\mathbf{a}$$

Oppure, qualora l'unica forza in gioco sia proprio la forza apparente:

$$\mathbf{F}_{app} = m\,\mathbf{a}_{app}$$

dove, è opportuno sottolinearlo, l'accelerazione apparente $\mathbf{a}_{app}$ è uguale e contraria a quella sperimentata dal sistema di riferimento (non inerziale) su cui si trova il corpo studiato.

Ad esempio: se un treno ad un certo punto frena con accelerazione di modulo a = -5 m/s^2, un passeggero di massa m = 70 *kg* si sentirà sottoposto ad una accelerazione (diretta in verso contrario) di modulo a_{app} = + 5 m/s^2 e in definitiva risentirà gli effetti di una forza (apparente) di intensità pari a 350 N!!

Con questa precisazione possiamo continuare ad usare tranquillamente le leggi della dinamica, e i risultati che si ottengono saranno ugualmente corretti.

L'esempio più comune di forza apparente si ha nei moti circolari, dove gli effetti della cosiddetta *forza centrifuga* sono evidenti ad ogni osservatore che si trovi in un sistema di riferimento rotante: una giostra, ad esempio, o una autovettura che affronta una curva …

7.10 Un metodo per risolvere i problemi

L'analisi e la risoluzione numerica di molti esercizi di dinamica può essere notevolmente semplificata dal seguire un preciso metodo di lavoro. Dopo aver letto attentamente il testo del problema, è consigliabile seguire questa procedura:

1) Disegnare correttamente il sistema con tutte le forze in gioco
2) Individuare, tratteggiandola nel disegno, la direzione di moto e decidere, in modo assolutamente arbitrario, il suo verso positivo
3) Scomporre lungo la direzione di moto tutte le forze che non siano ad essa allineate o perpendicolari e riportarle nel disegno
4) Applicare la seconda legge della dinamica **F** = M**a** alla direzione che interessa (quella di moto) ricordando che **F** rappresenta la "somma vettoriale" di tutte le componenti delle forze considerate, le quali avranno segno positivo o negativo in funzione della scelta eseguita nel punto 2.

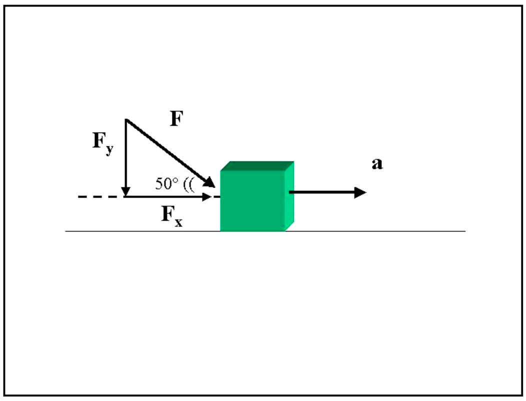
E' una ovvia conseguenza dell'arbitrarietà della scelta del segno per la direzione positiva di moto, che studenti diversi potrebbero arrivare a risultati opposti di segno nella risoluzione dello stesso problema. A prescindere da eventuali errori di calcolo, i due risultati potrebbero essere considerati ugualmente corretti in quanto esprimono la stessa realtà fisica.

Ad esempio: un corpo è appoggiato ad un piano orizzontale ed è sottoposto ad un sistema di forze che lo mette in moto verso sinistra. Il primo studente sceglie come direzione positiva quella verso destra: la risultante delle forze applicate al corpo avrà per lui segno negativo. Un secondo studente decide che la direzione positiva è quella verso sinistra: la risultante di forze avrà per lui segno negativo.

Anche se i due risultati sono diversi (opposti per segno algebrico) essi sono entrambi corretti perché esprimono "<u>la stessa realtà fisica</u>": per entrambi l'oggetto è sottoposto ad un insieme di forze che lo spinge … verso "sinistra"…

Esempi

Es. 1 - *Su un corpo di massa M = 5 kg è applicata una forza **F** di modulo pari a 10 N inclinata di un angolo di 50° rispetto alla direzione di moto orizzontale. Si calcoli l'accelerazione con cui si muove l'oggetto.*



▶

Poiché la forza **F** non è allineata con la direzione di moto (orizzontale), bisogna calcolare la componente di **F** lungo tale direzione. La seconda legge della dinamica diventa:

$\mathbf{F_x} = m\,\mathbf{a}$

$\mathbf{F}\,\cos 50° = m\,\mathbf{a}$

Sostituendo i valori numerici si ottiene:

$a = 1{,}29\ m/s^2$

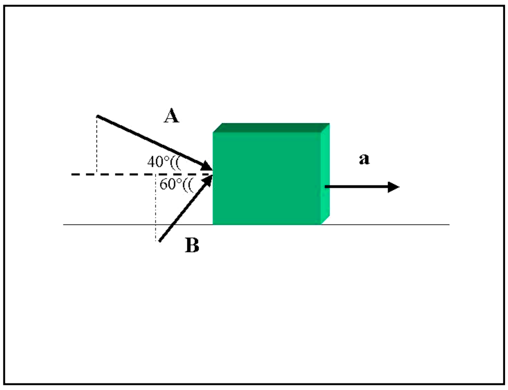
Es. 2 - *Un corpo di massa M si muove con una accelerazione di 5 m/s^2 spinto da due forze **A** e **B** dirette come in figura e di modulo, rispettivamente, 20 N e 15 N. Calcolare la massa M.*

▶

La massa M la si ottiene dalla seconda legge della dinamica:

$M = \mathbf{F} / \mathbf{a}$

dove con **F** si intende la risultante delle due forze applicate. Inoltre, essendo l'accelerazione un vettore diretto lungo l'asse delle x, delle due forze **A** e **B** andranno sommate solo le componenti orizzontali:



$A_x = A \cos 40° = 15{,}32\ N$

$B_x = B \cos 60° = 7{,}5\ N$

La forza risultante con direzione lungo l'asse x ha il seguente modulo:

$F_x = 22{,}82\ N$

La massa M risulta essere:

$M = (22{,}82\ N) / (5\ m/s^2) = 4{,}56\ kg.$