Capitolo 13

Le tre leggi della dinamica

13.1 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.

13.2 Il moto secondo Aristotele: il "finalismo"

Secondo Aristotele (383 a.C.-322 a.C.) la spiegazione del moto fa leva su tre concetti fondamentali:

1) la netta separazione tra il mondo celeste e quello terrestre

In Cielo il moto naturale è circolare uniforme, come quello dei pianeti e delle stelle. In Terra, invece, la situazione naturale è la "*quiete*". Al contrario, 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 ...

Vedremo più avanti, però, come tale osservazione non sia per niente corretta.

2) l'interpretazione *finalistica* per interpretare i "moti naturali"

Secondo Aristotele, tutta la materia è formata da quattro elementi fondamentali: aria, acqua, fuoco e terra. Ognuno di questi elementi ha il suo "luogo naturale" dove risiedere e stare "in quiete", 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 dove rimanere in quiete. 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). Inoltre, aggiunge Aristotele, un sasso e una piuma *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) la teoria dell'*horror vacui* per spiegare i cosiddetti "moti violenti".

I moti violenti possono essere rappresentati dall'esempio di una freccia scagliata a distanza dall'arco. In questo caso il moto della freccia continua anche dopo l'istante in cui la corda tesa 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", ma 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...

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

Anche le considerazioni di Galileo (1564-1632), duemila anni dopo Aristotele, muovono da precise osservazioni di tipo sperimentale, ma arrivano a conclusioni molto diverse da quelle suggerite dal filosofo greco.

1) 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 però 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 solo teorica, impossibile da realizzare nella realtà), le due quote coinciderebbero perfettamente.

Sotto tale ipotesi, 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, senza più fermarsi!

Questa tendenza dei corpi, in assenza di forze (in questo caso l'attrito...), a conservare lo

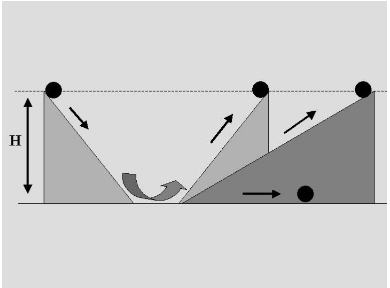


Figura 13.1: *Un oggetto in caduta da una quota* H *cerca di ritornare alla stessa quota di partenza, se non ci sono attriti. Se il secondo piano diventa orizzontale, il moto si trasforma in rettilineo uniforme. Galileo chiama "inerzia" la tendenza dei corpi a conservare il loro stato di moto.*

stato di moto precedente viene definita da Galileo **inerzia**, e il *moto rettilineo uniforme viene assunto dalla scienziato pisano come il vero moto "naturale"*.

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.

2) 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. *La velocità di caduta degli oggetti non dipende dalla loro massa.*

13.4 Il metodo scientifico: potenza e limiti

La differenza tra l'approccio aristotelico e quello galileano allo studio della natura è evidente: razionale e qualitativo il primo, razionale ma quantitativo il secondo. Il nuovo metodo, che da Galileo in avanti verrà chiamato "scientifico", può essere descritto in quattro passaggi fondamentali:

1) l'osservazione della realtà deve concretizzarsi in **un processo di misura delle caratteristiche quantitative** del fenomeno osservato,

2) l'elaborazione di una teoria generale, che deve avvenire attraverso **l'uso del linguaggio matematico**; ad essa si arriva per logica con **l'induzione**, cioè attraverso l'analisi di molte esperienze ripetute, anche tra loro diverse, delle quali si cercano di mettere in evidenza le caratteristiche di fondo, gli elementi teorici essenziali, utilizzati per fondare una visione sintetica e complessiva dell'intero fenomeno.

3) la critica della teoria attraverso **l'esperimento**, cioè la riproduzione controllata in laboratorio del fenomeno studiato, con il quale, attraverso una nuova serie di misure, si pone la teoria sotto giudizio valutandone criticamente la correttezza esplicativa, con la consapevolezza dell'inevitabile fallimento dell'impianto teorico qualora questo dovesse dimostrarsi inadeguato o fallace nell'interpretazione di anche una sola situazione sperimentale.

4) **l'applicazione della teoria a nuovi fenomeni attraverso un processo di deduzione**, per cui i risultati conseguiti vengono utilizzati per risolvere problematiche nuove, diverse da quelle di partenza, ma comunque connesse all'interno di una fenomenologia comune.

A differenza del modello scientifico aristotelico, in cui la teoria non rischia la prova dell'esperienza nel senso che non fornisce alla natura un linguaggio (matematico) che le consenta di esprimersi in un modo comprensibile all'Uomo, l'esperimento galileiano pone concretamente in rapporto tra loro "le sensate esperienze" e le "matematiche dimostrazioni", affidando all'esperimento e solo ad esso l'ultima parola sulla bontà di ogni teoria scientifica.

Da quanto esposto nelle pagine precedenti nello studente potrebbe formarsi l'idea che la filosofia proponga concetti sbagliati o, al più, vagamente plausibili, pure in contraddizione tra un autore e l'altro, e che la verità debba essere cercata con il solo metodo razionale suggerito dal metodo scientifico.

Se poi aggiungiamo che l'alba della scienza modernamente intesa, fatta coincidere con gli studi di fisica e di astronomia di Galileo (1600), ha causato attriti profondi con la Chiesa cattolica in quanto le nuove scoperte sembravano scontrasi con il contenuto della Bibbia, ancora interpretata in senso strettamente letterale, ecco allora che la frattura tra filosofia, scienza e religione sembrerebbe essere inevitabile, con l'unico risultato di affidare alla razionalità scientifica le uniche parole di verità possibili che l'Uomo può esprimere su se stesso e sul mondo naturale.

Questo approccio, detto **scientismo**, è in realtà una deformazione dell'ottimismo positivista che ha in parte attraversato gli ultimi due secoli di storia del pensiero e che si è rivelato, in gran parte, una ingenua illusione. Secondo tale (discutibile) impostazione, nessuna conoscenza deve essere considerata accettabile e certa se non è supportata dal metodo scientifico.

Lungi dal sostenere la correttezza di una tale posizione, ancorché parzialmente diffusa anche oggi, l'invito allo studente é di considerare come questi tre settori del pensiero umano (scienza, filosofia e religione), siano di fatto complementari, e come ciascuno di essi, limitatamente al suo ambito di azione, possa contribuire in modo proficuo e concreto non solo alla nostra conoscenza dell'Uomo e della Natura, ma anche e soprattutto ad affrontare quelle domande che nascono da una profonda ricerca di senso sull'Esistenza nel suo complesso, ricerca che valica i confini della realtà fisica misurabile.

L'errore che lo studente non deve compiere è quindi fondamentalmente di tipo epistemologico: non dobbiamo chiedere alla filosofia di chiarirci le idee sulle teorie del Big Bang relative alla formazione dell'Universo, così come non dobbiamo pretendere dalla scienza una improbabile risposta sull'"essere in quanto essere", sul divenire, sul concetto di Bene o di Giusto, sull'esistenza di Dio o sul significato della vita umana. . .

E questo perché, già al suo nascere, la scienza ritaglia la realtà e decide di occuparsi solo delle domande a cui è possibile dare una risposta "oggettiva". La realtà scientifica è quella del numero e della misura, dove le più importanti domande che l'Uomo si pone non trovano, però, spazio. Amore, amicizia, altruismo, fede... ad esempio, non sono grandezze fisiche, perchè concetti intrinsecamente non misurabili: su questi la scienza ha poco o nulla da dire.

Se poi aggiungiamo che anche lo sviluppo stesso delle scienze nel corso del Novecento sembra aver posto alle proprie possibilità di conoscenza dei limiti invalicabili[1], ecco che il fare del metodo scientifico l'unico strumento "certo" di conoscenza sembra essere una posizione almeno irragionevole.

E se anche un giorno l'Uomo dovesse arrivare a comprendere perfettamente i meccanismi fisici che spiegano la nascita, la vita, l'evoluzione e la morte dell'intero Universo, rimarrà a maggior ragione ineludibile la profonda e drammatica domanda che si pone il filosofo, matematico e scienziato tedesco Gottfried Leibnitz (1646-1716): " Perché esiste qualcosa, invece che il nulla ?? ...".

13.5 Il moto secondo Newton: la prima legge della dinamica

Tornando alla 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* ("I principi matematici della filosofia naturale", 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 $\vec{v}$ con cui il corpo era precedentemente in moto (o in quiete)

3) conservazione dello stato di equilibrio.

[1] Si fa riferimento, ad esempio, alla critica al principio di induzione; al Teorema di incompletezza di *Gödel*, per la matematica; al Principio di indeterminazione di *Heisenberg*, per la fisica; ad alcuni aspetti della teoria del caos...

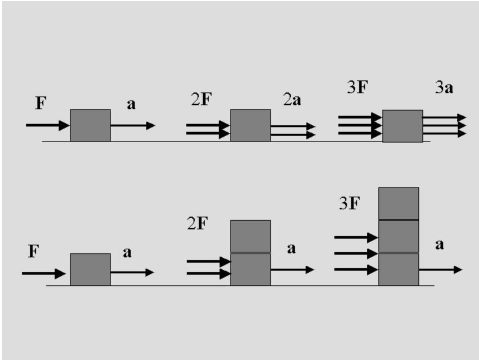


Figura 13.2: R*elazione sperimentale tra forza* $\overrightarrow{F}$ *ed accelerazione* $\overrightarrow{a}$*, con massa costante (sopra) e variabile (sotto).*

Le osservazioni precedenti di Galileo possono così essere riassunte da Newton in una semplice legge matematica, detta **Principio d'inerzia**, o **Prima legge della dinamica**, 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:

$$Se \quad \overrightarrow{R} = 0 \qquad allora \qquad \overrightarrow{v} = costante \quad (\overrightarrow{a} = 0 \longmapsto moto\, rettilineo\, uniforme) \tag{13.1}$$

Si noti come, nel caso di quiete, il valore "costante" della velocità può anche essere nullo ($\overrightarrow{v}$ = 0). In tal caso, un corpo in precedenza "fermo", rimane "fermo".

13.6 La seconda legge della dinamica

La **massa** è definita da Newton come *la misura della quantità di materia che compone un corpo.*

Essa è 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.

Possiamo ora rispondere alla seguente, fondamentale 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 $\overrightarrow{F}$ diretta, per comodità, in direzione parallela a quella di moto. Notiamo banalmente che lo stato di quiete del corpo si trasforma in un moto rettilineo uniformemente accelerato con accelerazione $\overrightarrow{a}$. Se ora allo stesso corpo applichiamo forze di intensità via via crescenti, ($2\overrightarrow{F}$, $3\overrightarrow{F}$, $4\overrightarrow{F}$ ...) è immediato accorgersi sperimentalmente che anche l'accelerazione che anima il suo moto aumenta in modo direttamente proporzionale (diventando $2\overrightarrow{a}$, $3\overrightarrow{a}$ ...). 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 $2\overrightarrow{F}$, $3\overrightarrow{F}$, $4\overrightarrow{F}$... 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 $\overrightarrow{a}$ devono ridursi in modo proporzionale (1/2 $\overrightarrow{F}$, 1/3 $\overrightarrow{F}$,...).

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:

$$\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a} \tag{13.2}$$

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/s^2. Quindi: $1N = 1kg \cdot 1m/s^2$.

13.7 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:

Se un corpo A esercita una forza $\overrightarrow{F_{AB}}$ *su un corpo B, allora il corpo B esercita una forza* $\overrightarrow{F_{BA}}$ *uguale e contraria sul corpo A.*

In formule:

$$\overrightarrow{F_{AB}} = -\overrightarrow{F_{BA}} \tag{13.3}$$

Cerchiamo di chiarire il concetto facendo un esempio: in 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 sulla bicicletta, nell'impatto, si viene ad esercitare la forza "più intensa" e, di conseguenza, è questa a "rivevere 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 (anche se contraria in verso) a quella che la bicicletta applica al 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, ovvero l'intensità dell'urto.* Se riscrivo la seconda legge della dinamica in questo modo, considerando solo i moduli:

$$a = \frac{F}{m}$$

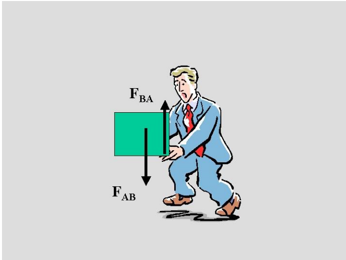
diventa più evidente il fatto che l'effetto dell'urto (l'accelerazione che causa i danni ai due mezzi) sia determinato come conseguenza della causa dell'urto (la forza in gioco) in funzione del valore delle due masse che si vengono a scontrare.

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 più elevata a sottoporre la struttura della bicicletta ad uno sforzo maggiore causando, di conseguenza, un danno maggiore, suggerendo l'idea (errata) che il mezzo più leggero sia stato sottoposto ad una forza più elevata.

13.8 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)



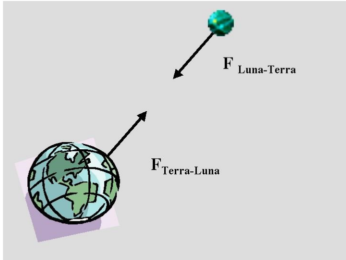


Figura 13.3: *Principio di azione e reazione: se un corpo A esercita una forza $\overrightarrow{F}$ sul corpo B, allora il corpo B esercita una forza uguale e contraria su A.*

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

In formule:

$$Se \quad \overrightarrow{R} = 0 \qquad allora \qquad \overrightarrow{v} = costante \quad (\overrightarrow{a} = 0 \longmapsto moto\, rettilineo\, uniforme) \tag{13.4}$$

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*

$$\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a} \tag{13.5}$$

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

Se un corpo A esercita una forza $\overrightarrow{F_{AB}}$ su un corpo B, allora il corpo B esercita una forza $\overrightarrow{F_{BA}}$ uguale e contraria sul corpo A.

In formule:

$$\overrightarrow{F_{AB}} = -\overrightarrow{F_{BA}} \tag{13.6}$$

1) Si noti come la prima legge della dinamica sia un caso particolare della seconda: infatti, se le forze in gioco hanno risultante nulla, nulla é anche l'accelerazione, e la velocità con cui si muove il corpo considerato non può che essere costante (eventualmente pari a zero, 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* (una agisce sul corpo A, l'altra sul corpo B). Se così fosse, infatti, la risultante delle forze applicate ad un qualunque corpo sarebbe sempre apri a zero e qualsiasi tipo di moto risulterebbe praticamente impossibile.

13.9 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 $\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{a}$ scomponendo le forze lungo la direzione che interessa (quella di moto) e ricordando che $\overrightarrow{F}$ 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 positivo. Anche se i due risultati sono opposti per segno algebrico, essi sono entrambi corretti perché esprimono "la stessa realtà fisica": per entrambi l'oggetto è sottoposto ad un insieme di forze che lo spinge ... verso "sinistra" !

13.10 Il sasso e la piuma

Come già detto all'inizio del capitolo, Galileo fu il primo ad intuire che, *in assenza di attriti, il moto in caduta libera degli oggetti non dipende dalla loro dimensione o dalla loro massa.* Un grosso sasso ed una piuma, se lasciati cadere dalla stessa quota con identica velocità iniziale, toccano terra nel medesimo istante.

Questa affermazione può ora essere facilmente dimostrata usando il secondo principio della dinamica. Sia M la massa del sasso e m la massa della piuma. Considerando solo i moduli, l'unica forza a cui entrambi i corpi sono sottoposti è la loro forza peso P. Calcoliamo l'accelerazione con cui cadono lungo la verticale.

Per il sasso:

$$F = Ma$$

$$F = P = Mg = Ma$$

$$Mg = Ma$$

$$a = g$$

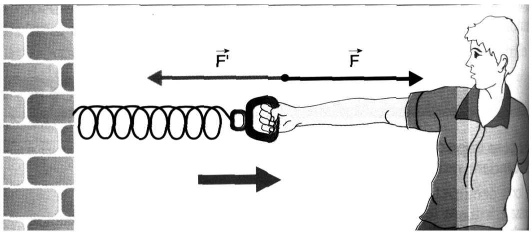


Figura 13.4: *L'azione e la reazione possono essere applicate allo stesso punto, ma non allo stesso corpo. F è applicata alla molla: F' è applicata alla mano del ragazzo. In caso contrario la risultante di tutte le forze sarebbe sempre nulla e ogni moto accelerato sarebbe impossibile da ottenere.*

Per la piuma:

$$F = ma$$

$$F = P = mg = ma$$

$$mg = ma$$

$$a = g$$

Conclusioni: il moto in caduta libera di due oggetti, anche molto diversi tra loro, non dipende dalla loro massa (che si semplifica nei conti) ed avviene con la stessa accelerazione: $g = 9,8m/s^2$. Se essi partono dalla stessa quota, arrivano a terra nel medesimo istante (ovviamente in assenza di attriti).

13.11 Il sasso e la Terra

Se il secondo principio della dinamica dimostra che un sasso e una piuma cadono con la stessa velocità, il terzo principio afferma che *un sasso e il pianeta Terra si attirano reciprocamente con due forze di uguale intensità*.

Consideriamo un sasso di massa $m = 1kg$. La forza F con cui esso è attratto dalla Terra è il suo peso: $F = ma = mg = P = 1kg\,x\,9,8N/kg = 9,8\,N$.

Questa forza conferisce al *sasso* una accelerazione verso il centro della Terra pari a

$$F/m = a = 9,8m/s^2.$$

La massa della Terra è invece $M = 6\,x\,10^{24}kg$. Per il terzo principio la Terra è attirata dal sasso con una forza uguale e contraria di modulo $F = 9,8\,N$ che imprime al pianeta *Terra* una accelerazione verso il sasso pari a

$$F/M = a = 1,6\,x\,10^{-24}\,m/s^2.$$

Tale accelerazione, di principio, esiste veramente, ma il suo valore é talmente piccolo che é di fatto impossibile misurarlo e quindi nessuno si accorge della sua esistenza !!

13.12 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 mossi 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 in 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**

$$\overrightarrow{F} + \overrightarrow{F_{app}} = m\overrightarrow{a} \tag{13.7}$$

E' opportuno sottolineare che l'accelerazione apparente 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 $a = -5m/s^2$, un passeggero di massa $m = 70\,kg$ si sentirà sottoposto ad una accelerazione (diretta in verso contrario) di modulo $a_{app} = +5m/s^2$ e in definitiva risentirà gli effetti di una forza (apparente) di intensità pari a 350 N!!

Dopo 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 ...

13.13 Le forze apparenti e l'assenza di peso

Abbiamo visto in precedenza come massa e peso siano due concetti profondamente diversi e come la forza peso sia determinata dal prodotto tra la massa inerziale dell'oggetto considerato e l'accelerazione di gravità locale. Ricordiamo che quest'ultima grandezza può variare a seconda della condizione in cui ci si trova, per cui, stabilito che la massa è una caratteristica del corpo, così non è per il suo peso.

Abbiamo anche visto come lo studio di corpi in sistemi di riferimento non inerziali (in moto, cioè, a velocità non costante) ci costringa a considerare il ruolo giocato dalle cosiddette "forze apparenti".

Ciò premesso, consideriamo ora una persona di massa M che voglia determinare il suo peso con una bilancia a molla all'interno di un ascensore fermo, oppure in moto con velocità costante, e infine con accelerazione $\overrightarrow{a}$ diretta verso l'alto o verso il basso.

Eseguiamo la misura, quindi, in un sistema di riferimento che di volta in volta è (o non è) inerziale. Vediamo cosa cambia nelle varie situazioni. Il peso è espresso dalla relazione: $\overrightarrow{P} = M\overrightarrow{g}$ dove $\overrightarrow{g}$ è l'accelerazione di gravità calcolata rispetto al sistema di riferimento in cui si trova la bilancia (l'ascensore). Abbiamo i seguenti casi:

1) se l'ascensore si muove con velocità costante (sia verso l'alto che verso il basso) non cambia nulla: ci troviamo in entrambi i casi in un sistema di riferimento inerziale e il valore delle accelerazioni non cambia. Nel nostro caso, l'accelerazione della persona rispetto a quella della bilancia (che si muove in modo solidale con l'ascensore) rimane $\overrightarrow{g}$, e il suo peso è identico al caso in cui l'ascensore fosse fermo

2) se l'ascensore si muove verso l'alto con accelerazione $\overrightarrow{a}$, anche la bilancia subisce la stessa accelerazione verso l'alto. La persona, invece, risente dell'accelerazione di gravità $\overrightarrow{g}$ verso il basso. Ma qualcosa ora è cambiato: non ci troviamo più in un sistema di riferimento inerziale e l'accelerazione con cui si muove l'ascensore introduce una forza apparente in modulo $F = Ma$ di segno contrario che l'uomo al suo interno risente e che deve considerare nei suoi conti. In altre parole, l'accelerazione dell'uomo rispetto alla bilancia che ha sotto i piedi (e che ora gli viene incontro), è aumentata e in modulo vale $(g + a)$. Di conseguenza anche il peso sarà aumentato, e in modulo varrà: $P = M(g + a)$

3) se l'ascensore si muove verso il basso con accelerazione $\overrightarrow{a}$, la bilancia fa altrettanto, sfuggendo dai piedi della persona che si vuol pesare, la cui accelerazione rispetto ad essa sarà ora ridotta in moulo al valore $(g - a)$. Tenendo conto della forza apparente $F = -Ma$ (di segno contrario rispetto all'accelerazione dell'ascensore), anche il peso risulterà diminuito: $P = M(g - a)$.

4) Un caso particolarmente interessante si ha quando l'ascensore è in *caduta libera*, cioè quando si muove verso il basso con accelerazione pari a quella di gravità $\overrightarrow{g}$ (come nel caso sfortunato di una rottura del cavo di sostegno). Bilancia e persona risultano avere accelerazione relativa nulla, in quanto fermi l'una rispetto all'altra, e la persona non avverte più il suo peso: in modulo, $P = M(g - g) = 0$.

Quindi possiamo concludere con la seguente affermazione: **un osservatore in caduta libera non ha peso**. Da questa semplice osservazione renderà il via, all'inizio del Novecento, una delle più grandi teorie della fisica moderna: la *Teoria della relatività ristretta,* di Albert Einstein.