

Percorso didattico di fisica

I principi della dinamica newtoniana

EGISTO CASALI, ssis VIII° ciclo

a.a. 2007/2008

27 febbraio 2008

1. Destinatari

L'unità didattica è rivolta agli allievi che frequentano il terzo anno di un Liceo Scientifico tradizionale. I programmi ministeriali per la classe terza di tale Liceo sono:

III Classe (2 ore settimanali)

Meccanica: Moto di un punto; velocità ed accelerazione come scalari e come vettori. Moto rettilineo uniforme. Forza e sua misura statica. Equilibrio di due o più forze applicate ad un solido. Centro di forze applicate ad un solido. Centro di forze parallele. Equilibrio nei solidi con un punto od un asse fisso. Macchine semplici: bilancia.

Principio di inerzia. Proporzionalità tra forza ed accelerazione. Massa e peso; misura dinamica delle forze. Eguaglianza fra azione e reazione: forza centripeta e reazione centrifuga. Caduta dei gravi libera e su di un piano inclinato. Cenni sul moto dei proiettili. Pendolo.

Lavoro e potenza: unità relative. Energia, sue forme e sua conservazione (non senza qualche discreta riserva in armonia con le moderne concezioni sull'equivalenza tra energia e perdita di massa). Cenni sulle resistenze di attrito e del mezzo.

Pressioni nei fluidi. Principi di Pascal e di Archimede. Vasi comunicanti. Pressione atmosferica. Legge di Boyle.

Cenni sul moto di un solido immerso in un fluido: navi, dirigibili e velivoli.

<http://www.edscuola.it/archivio/norme/programmi/scientifico.html#FISICA>

2. Prerequisiti

- Unità di misura e S.I.
- Grandezze scalari e vettoriali
- Composizione e scomposizione di vettori
- Concetto di punto materiale
- Cinematica unidimensionale e bidimensionale
 - Definizione di posizione, distanza e spostamento
 - Definizione di velocità media e istantanea come grandezze vettoriali
 - Definizione di accelerazione media e istantanea
 - Definizione di accelerazione come grandezza scalare e vettoriale
 - Moto rettilineo uniforme
 - Moto uniformemente accelerato
 - Oggetti in caduta libera
 - Equazioni del moto
 - Diagrammi posizione-tempo, velocità-tempo e accelerazione-tempo
 - Diagrammi atti a rappresentare la traiettoria (vedi moti parabolici)
- Equazioni algebriche di primo e secondo grado
- Coordinate cartesiane
- Tipi di proporzionalità e grafici relativi

3. Accertamento dei prerequisiti

Per la comprensione della seguente unità didattica è indispensabile la conoscenza dei prerequisiti sopra elencati, il cui accertamento avverrà mediante semplici test in classe, dialogo con gli studenti e le verifiche dei moduli precedenti. Se necessario si provvederà quindi al recupero dei prerequisiti mancanti. Si cercherà comunque di richiamare concetti e proprietà ogni volta che questi verranno utilizzati.

4. Obiettivi generali

- Acquisire le conoscenze, competenze e capacità previste dall'unità didattica per l'argomento "I principi della dinamica";
- Rendere gli studenti in grado di affrontare situazioni problematiche di varia natura avvalendosi dei modelli matematici e fisici più adatti alla loro rappresentazione;
- Condurre ad appropriato utilizzo del lessico specifico della fisica;
- Sviluppare la capacità di utilizzare metodi, strumenti e modelli matematici e fisici in situazioni diverse.

5. Obiettivi trasversali

- Sviluppare attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra docente e allievo e tra gli allievi;
- Perseguire ed ampliare il processo di preparazione scientifica e culturale degli studenti;
- Contribuire a sviluppare lo spirito critico e l'attitudine a riesaminare criticamente ed a sistemare logicamente le conoscenze acquisite;
- Contribuire a sviluppare capacità logiche ed argomentative.

6. Obiettivi specifici

CONOSCENZE

- Conoscere la definizione di massa inerziale e gravitazionale
- Conoscere la definizione di sistema di riferimento inerziale
- Conoscere la definizione di forza
- Conoscere il concetto di forza risultante
- Conoscere e saper enunciare la leggi del moto di Newton
- Conoscere la dimensione fisica della forza e la sua unità di misura nel S.I
- Conoscere la definizione di Peso

COMPETENZE

- Saper riconoscere e disegnare i diagrammi posizione-tempo, velocità-tempo e accelerazione-tempo nel caso di corpi soggetti o non soggetti a forze.
- Saper applicare la formula della seconda legge di Newton e le sue inverse nella risoluzioni di problemi.
- Saper disegnare uno schema di corpo libero
- Saper trovare la forza risultante agente su un corpo
- Saper disegnare uno diagramma di forze
- Saper calcolare il peso di un corpo.

CAPACITA'

- Saper utilizzare le conoscenze e le competenze acquisite per risolvere problemi
- Essere in grado di fare predizioni sui comportamenti dei corpi in situazioni reali
- Saper applicare le leggi studiate nella descrizione del moto di un corpo

7. Contenuti

- Definizione di massa inerziale e gravitazionale
- Definizione di forza
- Definizione di risultante di forze
- Prima legge del moto di Newton, concetto di inerzia, sistemi di riferimento inerziali
- Seconda legge del moto di Newton

- Strumenti di misura delle forze
- Definizione di unità di misura della forza: newton
- Schema del corpo libero
- Terza legge del moto di Newton
- Diagramma di forza
- Definizione di peso
- Peso apparente

8. Metodologie didattiche

Per svolgere gli argomenti di questa unità didattica si cercherà di seguire il seguente metodo: si farà uso dell'osservazione di fenomeni fisici su cui vogliamo costruire una teoria al fine di stimolare la curiosità e le osservazioni degli studenti. In qualità di insegnanti guideremo gli studenti verso l'acquisizione dei nuovi concetti e del linguaggio specifico annesso con esposizioni e spiegazioni. Al termine di ogni lezione si fisseranno le nuove nozioni attraverso lo svolgimento di esercizi e sondaggi dialogici.

9. Materiali e strumenti utilizzati

- Lavagna e gessi
- Libro di testo
- Calcolatrice scientifica
- Laboratorio di fisica fornito di apparati per lo studio delle leggi del moto. Come integrazione: software di simulazione.

10. Controllo dell'apprendimento

L'andamento e l'efficacia della metodologia didattica utilizzata vengono controllate attraverso verifiche formative in itinere costituite da discussioni in classe, stesura di relazioni da parte dello studente, svolgimento di esercizi in classe e a casa e attraverso verifiche sommative che permettono di verificare l'autonomia dello studente nell'utilizzo degli strumenti forniti.

11. Misurazione

La misurazione si attua attraverso:

- Prove orali individuali
- Verifica sommativa

12. Griglia per la misurazione

Per determinare gli esiti della verifica formativa attribuiamo ad ogni esercizio un punteggio.

La diversità di punteggio tra i vari esercizi rispecchia i livelli diversi di difficoltà in termini di conoscenze, competenze e capacità per svolgerli.

Nell'attribuire il punteggio completo, nullo o una frazione intermedia, teniamo conto dei seguenti indicatori (suggeriti dal Ministero dell'istruzione per la correzione della prova scritta di matematica):

- Conoscenze specifiche
- Competenze nell'applicare le procedure e i concetti acquisiti
- Capacità logiche ed organizzative
- Completezza della risoluzione
- Correttezza della risoluzione e dell'esposizione

E' chiaro che nel caso di errore nello svolgimento degli esercizi si presenterà la necessità di attribuire solo parte del punteggio in base alla gravità dell'errore.

Una volta soppesati così gli errori commessi dalla classe, applicheremo la stessa diminuzione di punteggio a ciascun studente che sarà incorso nello stesso errore. Per la griglia di misurazione relativa alla prova sommativa si farà riferimento a quella suggerita dal P.O.F.

13. Recupero

Affinché l'attività didattica risulti efficace e completa, si prevede di svolgere eventuali attività di recupero così articolate:

- Recupero da effettuare in classe durante le ore curricolari, attraverso la ripresa dei concetti non ben compresi e lo svolgimento di esercizi riguardanti tali argomenti.
- Assegnazione al singolo studente di esercizi mirati, in modo da risolvere i suoi problemi e superare le sue difficoltà

Per individuare gli argomenti che necessitano di recupero, sia a livello collettivo sia a livello individuale, ci si avvarrà di verifica formativa, delle prove orali e dell'attività di collaborazione insegnante-allievo.

14. Tempi

Per svolgere questa unità didattica si prevedono i seguenti tempi:

- Laboratorio fisico e/o informatico 3 – 4 h
- Lezioni frontali e dialogiche 7 – 9 h
- Verifica sommativa 1h
- Consegna e correzione verifica sommativa 1h

Per un totale di 12 – 15 ore (6 – 8 settimane).

15. Bibliografia

Libri di testo per le scuole secondarie superiori:

- o *Caforio, Ferilli* – “Nuova Fisica 2000” – LE MONNIER
- o *Ugo Amaldi* – La fisica per i Licei Scientifici: Volume 1 – ZANICHELLI

Testi di riferimento di carattere generale e universitario

- o *Sergio Rosati* – Fisica generale – Casa Editrice Ambrosiana - Milano

U.D. 1

I concetti di massa e forza sono così collegati ai tre principi della dinamica che forse l'approccio più utile alla comprensione è quello di dare delle definizioni temporanee intuitive dei due concetti per poi passare ad una definizione migliore attraverso la descrizione dei principi. Bisogna però spiegare bene agli studenti i passaggi da definizione a "ridefinizione" in modo che non appaiano come concetti nuovi ma come un solo concetto la cui comprensione va crescendo. I tre principi vengono quindi presentati come leggi del moto e nello stesso tempo consentono un approfondimento dei termini massa e forza. Inoltre seguendo questa strada, i due concetti, forza e massa, acquistano pari dignità. In questo modo infatti, non abbiamo bisogno di definire la forza per dedurre la definizione di massa dal secondo principio. Si evita così di dare definizioni spesso oscure per gli alunni.

La lezione può iniziare con una breve introduzione dell'argomento presentando i concetti di massa e forza in modo provvisorio e rozzo, ribadendo più volte che definizioni più precise si daranno in seguito man mano che la comprensione dell'argomento cresce.

La nostra esistenza e tutte le azioni che noi compiamo sono soggette a regole che riguardano la materia e il moto della materia. Queste regole sono le **tre leggi del moto di Newton**.

Osserviamo che in fisica si fa distinzione fra il concetto di *legge* e quello di *principio*, essendo quest'ultimo di carattere più generale. Le leggi di Newton sono un'eccezione di questa regola. Infatti è corretto sia parlare di **Principi della Dinamica** che di **Leggi di Newton**.

Nonostante l'evidente importanza, queste leggi sono estremamente semplici e sono applicabili a sistemi molto diversi tra loro, dai pianeti e galassie al famoso moto della mela che cade. Grazie alle leggi di Newton possiamo passare dalla descrizione del moto dei corpi, cioè la *cinematica*, alla *dinamica* ossia lo studio delle cause che generano il moto. Ecco perché esse prendono il nome anche di "**I tre principi della dinamica**".

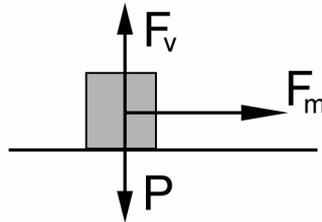
Con l'avvento della fisica moderna gli studiosi hanno poi visto che tali regole non sono più sufficienti a spiegare i fenomeni qualora i sistemi in esame abbiano particolari caratteristiche: se per gli atomi, che si muovono a velocità prossime a quella della luce e che hanno dimensioni microscopiche le leggi di Newton non sono più valide, tuttavia per la vita quotidiana esse rappresentano le regole assolute.

Una **forza**, detta in modo semplice, è una spinta o una trazione. Quando spingiamo una scatola per farla scivolare sul pavimento, stiamo esercitando una forza. Analogamente, quando teniamo un libro in mano, esercitiamo una forza verso l'alto per opporci alla spinta verso il basso della gravità (dovrebbero già intuire quest'ultimo concetto, senza saper dare una spiegazione rigorosa). Se mettiamo il libro su un tavolo, il tavolo esercita verso l'alto la stessa forza che noi esercitavamo un istante prima. Le forze, insomma, ci circondano da tutte le parti.

Quando spingiamo o tiriamo qualcosa, ci sono tre fattori che caratterizzano la forza che stiamo esercitando. La prima è il **modulo** o **intensità** della forza che applichiamo, la seconda è la **direzione** nella quale spingiamo o tiriamo, e la terza è il **verso**. Poiché una forza è determinata dal suo modulo, dalla sua direzione e dal suo verso, si può dedurre che essa è una **grandezza vettoriale**. (dovrebbero già aver visto un po' di teoria dei vettori; quantomeno la definizione e le composizioni). In ogni caso, di questo e altri concetti verranno date le definizioni operative e più rigorose.

In generale, su un oggetto, in un dato istante, agiscono molte forze. Come appena detto, un libro fermo su un tavolo subisce una forza verso il basso dovuta alla gravità e una forza verso l'alto dovuta al tavolo, che lo sostiene. Se spingiamo il libro parallelamente al tavolo, esso subisce anche una forza orizzontale dovuta alla nostra spinta. Intuitivamente, l'effetto totale delle forze esercitate sul libro è la somma (si scoprirà, vettoriale) degli effetti delle singole forze che agiscono su di esso.

Per ora, il diagramma seguente può essere introdotto come rappresentazione degli effetti delle singole “azioni”.



Si può sottolineare come l'origine delle forze (queste “azioni”) sia da imputare ai corpi ed alle loro posizioni reciproche.

Un secondo ingrediente chiave nelle leggi di Newton è la massa di un oggetto che, si vedrà, può rappresentare la misura di quanto difficile sia cambiarne la velocità: per esempio per mettere in movimento un oggetto fermo, fermare un oggetto in movimento o cambiare la direzione del suo moto. Se lanciamo una palla da baseball o ne afferriamo una che ci è stata lanciata, la forza richiesta non è molto grande. Ma se vogliamo mettere in movimento un'automobile o fermarne una che viene verso di noi, la forza che dobbiamo esercitare è senza dubbio maggiore. Intuitivamente possiamo dire che la massa dell'automobile è maggiore di quella della palla da baseball.

In accordo con l'uso quotidiano della parola, la massa può anche essere pensata come una misura della quantità di materia contenuta in un oggetto. Verrà comunque introdotta e definita in maniera operativa più avanti nell' unità didattica. (La stessa cosa vale per il concetto di Forza)

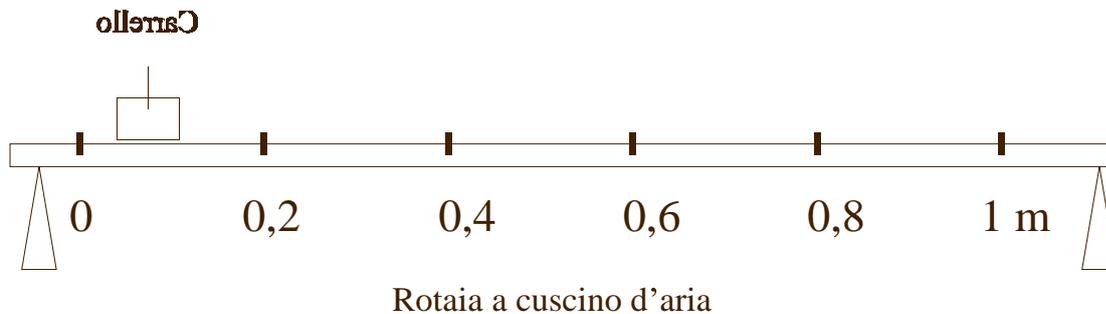
Dopo questa introduzione si cerca di condurre gli studenti alla comprensione del principio d'inerzia, presentando una gamma di fenomeni sia concreti che ideali. Gli studenti guidati dall'insegnante devono cercare di dare risposte proprie ai fenomeni anche commettendo errori e affrontando le contraddizioni. A questo punto gli studenti sono invitati a rispondere usando parole proprie evitando l'uso del vocabolario specifico. Solo in questo modo potranno liberarsi dei loro preconcetti. L'insegnante ha il compito di condurre gli studenti attraverso una serie di situazioni di difficoltà crescente con lo scopo di avvicinare gli studenti alla comprensione delle idee. Gli esperimenti possono essere effettuati, in base alle disponibilità della scuola, con un blocco di ghiaccio secco e una superficie ben levigata oppure con apparati fisici simili (rotaia a cuscino d'aria) o attraverso la simulazione al computer.

• Il primo principio di Newton

L' esperienza del ghiaccio secco è presente praticamente in tutti i libri di testo ed è sostanzialmente equivalente a quella fatta con la rotaia (o con il piano) a cuscino d' aria.

Rotaia a cuscino d'aria

Una rotaia a cuscino d'aria è un apparecchio didattico costituito da una rotaia orizzontale attraversata da numerosi forellini da cui escono getti d'aria che formano un cuscino d'aria che sostiene carrelli e altri corpi usati per esperienze sul moto, i quali si muovono “scivolando” in buona approssimazione senza “impedimenti”.



E' chiaro che, non avendo ancora sviluppato l' argomento "forze d' attrito", ci si accontenta dell' idea intuitiva riferita ai concetti di "superficie liscia" e di "blanda opposizione al moto"; basterà fare semplici considerazioni qualitative sul moto del carrello su una superficie qualsiasi, per evidenziare la presenza di "agenti oppositori" al moto.

Una volta messo in moto, il carrello scivola finché non finisce contro il paraurti respingente che si trova alla fine della rotaia. Il paraurti esercita sul carrello una forza che causa il cambiamento del verso del suo moto. Dopo aver rimbalzato contro il respingente, il carrello si muove nuovamente nel verso opposto.

Per monitorare il moto del corpo, fissiamo dei traguardi ad intervalli di spazio regolari e con un cronometro rileviamo i tempi che il carrello impiega a percorrere tali distanze.

Per eseguire le seguenti operazioni, possiamo utilizzare comodamente un foglio elettronico di calcolo. Organizziamo i dati raccolti (con i relativi errori sperimentali) in una tabella; gli stessi dati li andremo a rappresentare su di un sistema di riferimento ortogonale posizione – tempo, e cercheremo la curva che meglio interpola i dati sperimentali. A questo punto, osservando il grafico fornito dal foglio elettronico, è più semplice intuire come sono andate le cose sulla rotaia. La curva "assomiglia" molto ad un tratto retta; ciò dovrebbe far ragionare sul fatto che evidentemente, nella nostra esperienza, c'è proporzionalità diretta tra le grandezze considerate, lunghezza e tempo (sempre a meno degli errori sperimentali, dovuti soprattutto al rilevamento degli istanti di tempo). Ma quanto vale la costante di proporzionalità tra queste classi di grandezze?

Dovrebbe già essere chiaro dalla cinematica che questo è il caso di un moto uniforme (rettilineo), in cui il corpo (nel nostro caso il carrello) percorre distanze uguali in intervalli di tempo uguali (velocità costante). La pendenza della retta che interpola a meno degli errori sperimentali i nostri dati, è proprio la velocità del carrello in moto rettilineo uniforme. Essa è la costante di proporzionalità tra i valori delle due classi di grandezze considerate.

Questa esperienza ha lo scopo di far scoprire agli alunni che non è necessario spingere continuamente il carrello, per far sì che quest' ultimo mantenga la propria velocità costante e diversa da zero. E' un primo esempio di relazione tra forza e moto. (seppure intuitivamente)

Dopo le osservazioni sul moto del carrello sulla rotaia in assenza (quasi) di "opposizioni", sarebbe utile sfruttare l' esperienza del disco-blocco sul piano a cuscino d' aria, per stimolare altre osservazioni degli studenti. Forse nel piano ci sono maggiori possibilità di interagire da parte loro con l' apparato sperimentale. Potrebbero nascere dubbi o considerazioni di questo tipo:

Come si comporta il blocco una volta che è posto in movimento? Qual è la differenza tra questa situazione e quella in cui gli oggetti scivolano su superfici comuni?

Qual'è la differenza tra il comportamento del blocco sottoposto a una spinta continua e quello dello stesso blocco a cui viene dato un "colpo secco" ?

Quanto deve essere intensa una forza per imprimere una minima accelerazione al blocco? In altre parole, esiste un effetto di soglia?

Supponendo che il carrello sia già in moto, che cosa occorre fare per far diminuire lentamente la sua velocità?

Supponiamo che all'inizio il corpo si muova, e che poi si eserciti una forza costante, sia nel senso di aumentare la velocità, sia nel senso opposto. Che cosa fa il corpo?

Supponiamo ora di rendere la forza agente sempre più piccola. Come si comporta ora il corpo?

Che cosa succede quando la forza applicata arriverà ad essere nulla?

Supponiamo di esercitare due forze costanti in direzioni opposte, una con ogni mano. Come si comporta il corpo quando una delle due forze è maggiore dell'altra e quando sono uguali?

Supponiamo che il corpo sia in moto: quali azioni cambiano la direzione del moto?

Attraverso una discussione in classe, si può arrivare progressivamente alla formalizzazione dei concetti emersi dalle esperienze di laboratorio e dalle riflessioni inerenti le domande appena citate.

Prime conclusioni ed osservazioni:

1. Se su di un corpo in movimento di moto rettilineo uniforme non agiscono forze, il corpo continua a muoversi di moto rettilineo uniforme.
2. Per accelerare un corpo è necessario applicare ad esso una forza costante e non impulsiva ("colpo secco"). Una forza impulsiva mette in moto il corpo che si muoverà poi di moto rettilineo uniforme (esperienza del carrello a cuscino d'aria). Precisiamo bene che una forza impulsiva accelera il corpo solo limitatamente al brevissimo periodo in cui agisce, che schematizziamo con il termine "istante"; in sostanza tale forza mette semplicemente il corpo in moto rettilineo uniforme. (Non si chiede ancora di trovare una relazione rigorosa tra forza e accelerazione)
3. Una qualsiasi forza, anche molto piccola in modulo, in assenza di attrito, è in grado di accelerare un corpo. Questo non avviene normalmente proprio per effetto della forza di attrito (forza resistente).
4. Quando su un corpo agiscono più forze queste (le cause) "si sommano" e il corpo si mette in moto come se su di esso agisse un'unica forza data dalla somma degli effetti di tutte le forze. (Si vedrà che questa "forza somma" si chiama **risultante**. Il concetto verrà ripreso nella trattazione del secondo principio. Per ora è sufficiente la comprensione intuitiva).
5. Quando vengono applicate una o più forze ad un corpo, esse modificano il suo moto sia in termini di aumento o diminuzione di velocità scalare che di cambiamento di direzione e/o verso.

Converrà a questo punto dare una definizione, anche rozza, di forza di attrito, attraverso esempi di situazioni di vita quotidiana (insistendo sulla consequenzialità di queste forze e sugli effetti che esse provocano).

Possiamo proporre la distinzione delle forze in base alla loro natura, in due classi:

- **Forze attive**
- **Forze passive**

Esempi di forze attive sono la trazione e la spinta da parte di corpi animati (es: molle), la forza gravitazionale della Terra sui corpi e molte altre che verranno studiate in seguito (forza elettrica e magnetica per esempio). Le forze passive sono quelle che nascono e si modificano in risposta a quelle attive. Per esempio la deformazione di un tavolo o di un pavimento sotto il peso di un corpo oppure le forze di attrito, le quali si oppongono al movimento.

Possiamo quindi dire che la forza di attrito è una forza di tipo passivo che nasce e si modifica in risposta al movimento di un corpo. E' l' opposizione al moto osservata in precedenza.

Tutte queste osservazioni sono riassunte nella **prima legge del moto di Newton**

- **Un punto materiale fermo, rimane fermo finché rimane nulla la somma degli effetti delle forze ad esso applicate.**
- **Un punto materiale in moto rettilineo uniforme continua a muoversi con la stessa velocità finché rimane nulla la somma degli effetti delle forze ad esso applicate.**

Prima di tutto facciamo notare che si parla di punto materiale e non di corpo. Naturalmente si tratta di un' approssimazione. Bisogna far notare che se ci si occupa di moti rotazionali, tale approssimazione non è più lecita. Quindi bisognerà spiegare il criterio in base al quale tale approssimazione viene considerata lecita. Si tratta di intendere il punto materiale come un corpo di dimensioni lineari piccole rispetto alle altre grandezze in gioco, e del quale non interessa studiarne la struttura, né eventuali rotazioni su sé stesso. Naturalmente occorre mettere in relazione l' approssimazione che andiamo a fare, con la situazione che si vuole studiare. Per esempio : una navicella spaziale può assimilarsi a un punto materiale quando ruota attorno alla Terra, e se ne considera il moto rispetto a questa, ma certamente tale schematizzazione non è accettabile quando se ne studia il rientro nell' atmosfera e il comportamento delle sue diverse parti, né quando la navicella spaziale viene considerata da distanze dell' ordine delle sue dimensioni.

Altra osservazione riguarda l' espressione usata : **somma degli effetti delle forze**. Abbiamo già accennato alla natura vettoriale delle forze; intenderemo tale espressione come "**risultante delle forze**", in quanto si presumono acquisiti i concetti elementari di calcolo vettoriale.

Il primo principio di Newton può anche essere enunciato così:

Un corpo permane nel suo stato iniziale di quiete o di moto rettilineo uniforme a meno che non sia soggetto a forze esterne

La prima legge di Newton è anche conosciuta come **legge d'inerzia**, espressione molto appropriata se pensiamo al significato letterale della parola "inerzia".

Per quanto visto possiamo dare una definizione qualitativa di forza:

Definizione: Diciamo **forza** una qualunque azione che è in grado di cambiare la velocità (intensità, direzione e/o verso) di un corpo.

Osserviamo che la definizione è qualitativa e non quantitativa cioè non mi permette di quantificare la forza o di dire se una forza è maggiore dell'altra. Per arrivare a una definizione quantitativa dobbiamo prima enunciare il secondo principio di Newton.

Prima di ciò vediamo due aspetti su cui ragionare; può essere utile ragionare sull' ultima definizione data: quella di forza. Anche alla luce delle esperienze fatte in laboratorio con il carrello che viene spinto su una superficie che non sia a cuscino d' aria, potrebbe sorgere il dubbio che una spinta non sufficientemente intensa per vincere la forza d' attrito (e quindi che non ha conseguenze visibili in termini di moto), non possa essere considerata una forza. Effettivamente, in una situazione simile, la spinta non provoca cambiamento di velocità; quindi la nostra definizione di forza sembra non essere adeguata....motivo in più per ragionare sulle forze di attrito.

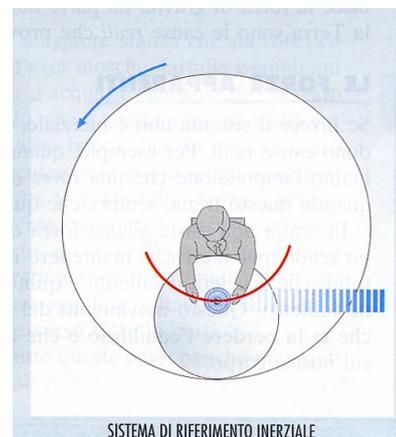
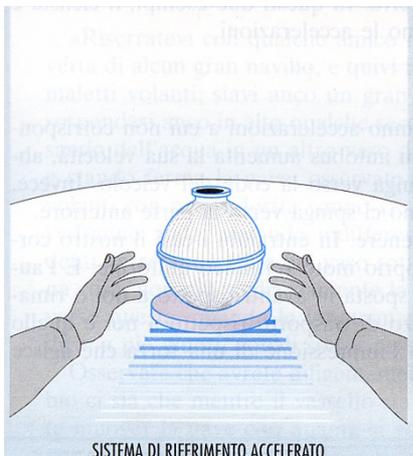
Il secondo concetto determinante, è il concetto di sistema di riferimento. L' enunciato del primo principio da noi dato, è infatti incompleto nel senso che segue.

Si è detto che, in base alla prima legge di Newton, essere fermi o in movimento con velocità costante sono situazioni equivalenti (in entrambi i casi $\mathbf{a} = \mathbf{0}$). Questa osservazione ci permette di affrontare il tema dei **sistemi di riferimento inerziali**. Ricordiamo che un **sistema di riferimento** è l'insieme di tutti gli oggetti rispetto ai quali il movimento avviene con le stesse caratteristiche.

Il principio d'inerzia non è valido in tutti i sistemi di riferimento. Sottolineiamo come l'origine delle forze sia da imputare ai corpi ed alle loro posizioni reciproche, in altri termini non appare ragionevole che compaiano forze per il solo fatto di cambiare sistema di riferimento.

Proviamo a supportare quest' ultima affermazione (forte) con un esempio.

Consideriamo una piattaforma rotante ed un tavolo su di essa. Chi si trova su tale piattaforma e appoggia sul tavolo un disco a ghiaccio secco, lo vedrà sfuggire verso l'esterno. Egli si aspetta che il disco resti fermo dal momento che esso è semplicemente appoggiato sul tavolo che nel suo sistema di riferimento risulta in quiete (sistema di riferimento solidale alla piattaforma).



Quindi per questo osservatore non vale il principio d'inerzia. Ribadiamo che nessuna spinta è stata applicata al disco.

Un altro osservatore, situato all'esterno della piattaforma, fino a quando il disco è nelle mani dell'uomo seduto, lo vede spostarsi lungo una circonferenza. Poi quando il disco viene lasciato lo vede spostarsi nel verso della tangente a questa circonferenza. Per l'osservatore esterno il principio d'inerzia è valido.

C'è forse una contraddizione? No, perché il sistema di riferimento dell'uomo seduto è accelerato. Il principio di Inerzia può essere applicato solo in una categoria limitata di sistemi di riferimento, detti **sistemi di riferimento inerziali**.

D'ora in poi quando si enuncia il primo principio della dinamica si dovrà sempre specificare che la sua validità è circoscritta ai sistemi di riferimento inerziali:

In un sistema di riferimento inerziale, se la risultante delle forze agenti su un punto materiale è nulla, la velocità del punto materiale è costante (in intensità direzione e verso).

Un sistema di riferimento con l'origine nel centro del Sole e i tre assi che puntano stabilmente verso tre stelle molto lontane (chiamate stelle fisse) è con ottima approssimazione un sistema di riferimento inerziale. (osserviamo come dietro il sistema delle stelle fisse ci sia un'ipotesi di località) I sistemi di riferimento fissi sulla Terra ruotano rispetto al sistema che ha il centro nel Sole, poiché il nostro pianeta compie ogni giorno un giro completo intorno a se stesso. Tuttavia la velocità angolare di rotazione della Terra è talmente piccola che in pratica le deviazioni del principio d'inerzia sono osservabili soltanto se si eseguono misure di grande precisione oppure se si considerano sistemi molto estesi come una corrente marina o una perturbazione atmosferica. Con una buona approssimazione i sistemi di riferimento terrestri possono essere considerati inerziali.

Se un sistema si muove con velocità costante rispetto ad un sistema di riferimento inerziale è anch'esso inerziale.

Quindi è l' accelerazione (e non il movimento) del sistema di riferimento che ci dà l' informazione sulla validità o meno del principio d' inerzia (e quindi ci dice se il sist. di riferimento è inerziale).

Un sistema di riferimento è inerziale, se rispetto ad esso vale il principio d' inerzia.

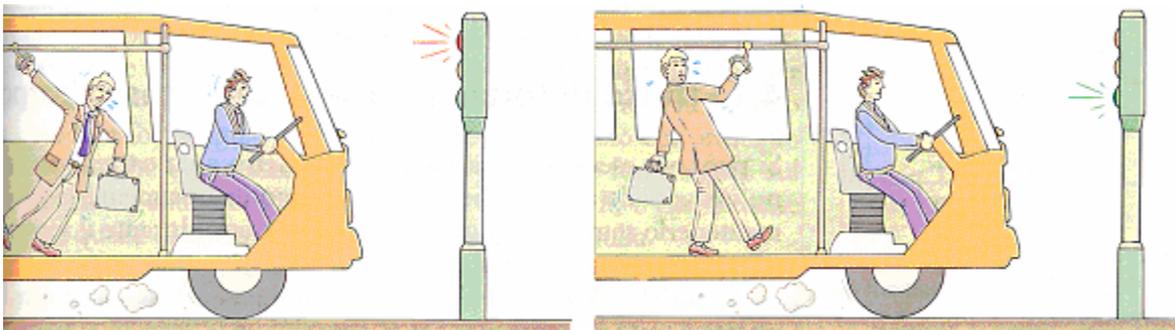
Se il sistema di riferimento non è inerziale si hanno accelerazioni a cui non corrispondono cause reali cioè forze che determinano quell'accelerazione.

In tali casi sembrano agire delle "forze apparenti" che non dipendono dai corpi ma solo dal sistema di riferimento.

Un esempio di questo genere è la cosiddetta **forza centrifuga**, che fa sentire i suoi effetti all'interno di un mezzo di trasporto che descrive una curva. In questo caso sembra esistere una forza che ci spinge verso l'esterno ma ciò dipende dal fatto che il sistema di riferimento in cui ci troviamo non è inerziale (esiste una accelerazione centripeta).

La stessa forza centrifuga è la causa apparente del moto del disco a ghiaccio secco dell' esempio precedente. (Nella dinamica dei sistemi relativi, vengono ripresi questi esempi, e si capirà forse meglio, come devono essere trattati)

Anche nell'esempio classico dell'uomo in piedi sull'autobus si ha l'impressione di una forza che agisca su di lui . Durante una brutta frenata infatti, tende a cadere in avanti. Durante la partenza tende a cadere indietro. Anche in questo caso, il sistema di riferimento solidale all' autobus non è inerziale, ed il primo principio di Newton non vale (rispetto a tale sistema).



Sono tutti casi in cui il sistema di riferimento considerato è accelerato (o decelerato), e quindi non inerziale. In quest' ultimo caso il sist. di riferimento solidale all' autobus è accelerato rispetto ad un sist. di riferimento solidale alla strada.

Possiamo pensare, invece, al moto rispetto ad un sistema di riferimento solidale alla strada. In tal caso il principio di inerzia è rispettato.

Il ragionamento sulla validità del principio di inerzia, ristretta ad una classe particolare di sistemi di riferimento, è molto utile alla comprensione del principio stesso. Occorre quindi insistere con esempi, figure, simulazioni, con lo scopo di mettere in risalto l' importanza del sistema di riferimento considerato, e come la non curanza di ciò possa essere origine di misconcezioni.

Alcuni testi preferiscono iniziare la trattazione del primo principio facendo considerazioni storico - epistemologiche. Infatti questo tipo di approccio aiuta lo studente a capire i passi logici che portano alla formulazione del primo principio. Particolarmente utile risulta ragionare sul fatto che per quasi 2000 anni si pensò che se un corpo si muoveva, di questo moto era responsabile una forza costantemente applicata.

- Cosa non va in tale ragionamento? Di che cosa non si tenne conto?

In tutti i libri di testo è presente la testimonianza del contributo di **Galileo**, il più importante scienziato del XVI secolo; il primo a dimostrare che non era necessaria una forza per mantenere un corpo in movimento. Galileo “dimostrò” che, soltanto quando è presente l’attrito è necessaria una forza per mantenere in moto un corpo. Naturalmente si tratta sempre di approssimazioni e di passaggi a situazioni limite:

Egli, attraverso l’esperienza delle sferette e dei piani inclinati, si rese conto che a causa delle forze d’attrito ogni corpo materiale oppone una certa resistenza a variare il proprio stato di moto e chiamò **inerzia** tale resistenza. Naturalmente si trattava sempre di approssimazioni, di passaggi a situazioni limite ideali.

In effetti fu Galileo e non Newton a rendersi conto della validità del primo principio della Dinamica ma la formalizzazione della Legge fu data da Newton e quindi prende il suo nome. Isaac **Newton** nacque meno di un anno dopo la morte di Galileo. Egli formulò nel 1665, all’età di 23 anni, le sue famose leggi del moto.

Una cosa va detta e ripetuta. Fino a questo punto si è parlato di “forze” e di “risultante di forze”, in una maniera che sfiora l’aspetto quantitativo. L’importante è la comprensione del primo principio in maniera qualitativa, attraverso osservazioni derivanti da esperienze della vita comune ed esperimenti condotti in laboratorio. D’altra parte, il concetto di forza è intuitivo e vicino a noi, a tal punto da permetterci una prima trattazione qualitativa delle “potenziali cause della variazione del moto” e delle “somme di tali cause”. Soprattutto attraverso l’esperienza del piano a cuscino ad aria, possiamo renderci conto in maniera diretta ed interattiva di quanto ci appartengano, in modo naturale, questi due concetti.

• La massa di un corpo

Se rispetto ad un sistema di riferimento inerziale un corpo non si muove di moto rettilineo uniforme, l’accelerazione posseduta dal corpo ad ogni istante deve essere attribuita alle azioni esercitate su esso da altri punti materiali circostanti.

Newton fu il primo a studiare in maniera quantitativa le accelerazioni acquistate da due corpi interagenti esclusivamente tra loro (cioè quando le interazioni con altri corpi possono venire ragionevolmente trascurate), con le conclusioni seguenti:

- a) se a un certo istante uno dei due corpi possiede un’accelerazione $\mathbf{a}_1 \neq 0$, anche l’altro corpo possiede un’accelerazione $\mathbf{a}_2 \neq 0$
- b) le due accelerazioni hanno la stessa direzione ma versi opposti
- c) i moduli \mathbf{a}_1 e \mathbf{a}_2 delle due accelerazioni stanno in rapporto costante, cioè il valore del loro rapporto è indipendente dal modo in cui i due corpi interagiscono ed è caratteristico dei due corpi considerati
- d) se i due corpi sono della stessa sostanza ma hanno volumi diversi, il corpo più piccolo acquista un’accelerazione maggiore

Tutte le osservazioni sperimentali (va ribadita tale natura) sono in accordo con le conclusioni di Newton; dal punto c) si ha:

$$\frac{a_2}{a_1} = \text{costante} = C_{12}$$

e la quantità adimensionale C_{12} (è un numero) ha un valore dipendente unicamente dalla particolare coppia di corpi considerati; se si tiene conto del punto b) la relazione precedente si traduce nella seguente uguaglianza vettoriale:

$$\mathbf{a}_2 = - C_{12} \mathbf{a}_1$$

Ad ogni istante le accelerazioni dei due corpi sono direttamente proporzionali.

E' possibile effettuare la verifica sperimentale di questo fatto in diversi modi; uno di questi è rappresentato dall' esperienza della misura del rapporto di accelerazioni con rotaia e carrelli. In verità quello che andremo a fare è il calcolo del rapporto tra le velocità dei carrelli (cosa operativamente più semplice) su cui verranno posizionate delle masse ; naturalmente bisognerà spiegare l' equivalenza sostanziale e numerica dei due rapporti, senza tuttavia considerare derivate ed integrali. Una trattazione rigorosa di ciò richiede l' uso di strumenti matematici che non fanno ancora parte delle conoscenze degli studenti della terza classe.

Appare comunque abbastanza intuitivo che la proporzionalità diretta tra le velocità implica la proporzionalità diretta tra le accelerazioni.

Quello che vogliamo fare è mostrare che:

$$\frac{\Delta v_2}{\Delta v_1} = \text{costante} = C_{12}$$

Dove Δv_1 e Δv_2 sono le differenze tra velocità all' istante t e velocità all' istante t_0 ,possedute dai carrelli se viene preso in considerazione l' intervallo di tempo arbitrario (t_0, t) .

$$\text{Vettorialmente si ha} \quad \Delta \mathbf{v}_2 = -C_{12} \Delta \mathbf{v}_1 .$$

Su un binario orizzontale vengono posti due carrelli di massa trascurabile liberi di scorrere su di esso con attrito idealmente minimo.

Sui carrelli vengono posti carichi di una certa massa. Si possono scegliere masse di cui sia noto il rapporto, in modo tale da verificare in corso d'opera se l' esperimento stia riuscendo.

Questa esigenza in realtà prevede una certa consapevolezza dell' esito finale; tuttavia, la richiesta sulle masse non è necessaria al fine del calcolo del rapporto tra le velocità (che poi si dimostrerà costante all' interno di ogni prova effettuata). E' una scelta di comodo, fatta per mettere in risalto in maniera maggiore i risultati che vogliamo ottenere. E' utile, comunque , ripetere l' esperienza con masse incognite (o comunque non dare subito agli alunni questa informazione).

Tra i due carrelli è interposta una molla, che viene mantenuta in compressione da un piccolo cappio di nylon che avvicina i carrelli. Al variare della lunghezza del cappio si ottengono diversi gradi di compressione della molla, che, a loro volta, imprimono una diversa accelerazione (quindi velocità terminale) a ciascuno dei due corpi.

Sul binario, a distanza sufficiente da ciascun carrello, viene posto un traguardo a distanza nota dal rispettivo fine-corsa. Al passaggio di ciascun carrello al primo traguardo, un osservatore munito di cronometro aziona il conteggio dei centesimi di secondo. Tale conteggio viene interrotto all'arrivo a fine corsa del carrello stesso.

Conviene fare un numero considerevole di prove (almeno una decina). Dopo aver raccolto i dati in una tabella, occorre calcolare le velocità medie dei carrelli in ciascuna prova (che possono essere ragionevolmente considerate delle approssimazioni delle velocità istantanee del carrello nell'istante medio), ed i relativi rapporti tra le velocità. Occorre considerare e calcolare gli errori relativi e poi quelli assoluti, che in questa esperienza possono essere anche considerevoli. Per fare questo possiamo avvalerci del foglio elettronico, attraverso il quale possiamo anche tracciare il grafico, che nella migliore delle ipotesi dovrebbe assomigliare ad un tratto di retta. Naturalmente sull' asse delle ascisse verranno inseriti i numeri della prova, sull' asse delle ordinate i rapporti tra le velocità.

A meno degli errori sperimentali, il grafico può darci l' idea della proporzionalità diretta tra le velocità.

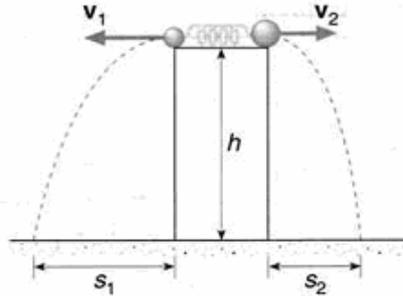
Un' altro sistema per un' analogo misurazione è indicato nella figura sottostante.

Sospinto dalla molla ciascun corpo (meglio due sfere) acquista una certa velocità, cade dalla colonnina sulla quale si trova e (sotto l' azione della gravità) descrive un arco di parabola: dalla misura degli spostamenti orizzontali subiti dai corpi prima di giungere a terra si risale alle loro velocità iniziali. Si ha per il corpo 2 : (quale scelta sul sistema di riferimento è più comoda ?.....)

$$\begin{cases} s_2 = v_2 t \\ h = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad \text{e quindi} \quad v_2 = s_2 \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad \text{e analogamente} \quad v_1 = s_1 \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad \text{per il corpo 1}$$

Di conseguenza:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{s_2}{s_1}$$



(*) La molla rappresenta il dispositivo col quale i due corpi vengono fatti interagire; ci si riduce a due soli sistemi materiali saldando un corpo a un'estremità della molla e mettendo il secondo corpo in contatto con l'estremità libera.

Dalle misure di s_1 e s_2 segue direttamente il rapporto v_2/v_1 , cioè il valore della costante C_{12} . L'esperienza si può ripetere comprimendo la molla in maggiore o minore misura, cambiando la molla, ma finché non si cambia almeno uno dei corpi il valore di C_{12} risulta costante entro i limiti degli errori sperimentali. (il valore è caratteristico della coppia di corpi considerati)

Si può provare a cambiare il carico dei due carrelli o i corpi interagenti attraverso la molla, con il risultato di trovare sempre un unico valore caratteristico della coppia di corpi considerati.

Questo fatto permette di associare ai corpi due valori, che chiameremo m_1 e m_2 , caratteristici dei corpi considerati, tramite l'equazione:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = C_{12} \quad (1)$$

La nuova grandezza fisica scalare così introdotta viene chiamata **massa**: m_1 e m_2 sono le masse dei due corpi. Dalla relazione sopra scritta si ha:

$$m_2 = m_1 \frac{a_1}{a_2} = \frac{1}{C_{12}} m_1 \quad (2)$$

Poiché il rapporto $\frac{a_2}{a_1} = C_{12}$ può essere determinato sperimentalmente (come abbiamo proposto,

o con altri metodi equivalenti), l'equazione precedente permette di calcolare la massa m_2 in termini della massa del primo corpo. Analogamente, se si considera un terzo corpo, la sua massa m_3 risulta:

$$m_3 = m_1 \frac{a_1}{a_3} = \frac{1}{C_{13}} m_1$$

(sperimentalmente si trova che valgono relazioni di proporzionalità tra C_{12} , C_{32} , C_{31})
 In questo modo si può calcolare la massa di ogni corpo in termini della massa assegnata al corpo 1, che può venire considerato come campione dell'unità di massa. Nel sistema di misura MKS l'unità di massa è il chilogrammo.

(Il chilogrammo (1kg) è la massa di un cilindro di platino iridio conservato nel Laboratorio di Pesi e Misure a Sèvres). E' un fatto convenzionale.

Potrebbe essere utile ricordare che il chilogrammo è con buona approssimazione la massa di un litro (1 dm³) di acqua distillata alla temperatura di 4 °C (quattro gradi Celsius).

Quando due corpi di masse diverse interagiscono tra loro, il corpo di massa maggiore acquista un'accelerazione minore: in questo senso la massa è una misura dell'inertza presentata da un corpo nel mettersi in movimento, e per tale ragione la massa definita attraverso la relazione precedente viene chiamata **massa inerziale**.

Si verifica sperimentalmente che **la massa è una grandezza fisica additiva**.

Cioè, se due corpi 1 e 2 di masse m_1 e m_2 vengono uniti insieme a formare un corpo C, la massa m_C di C è uguale alla somma delle masse di 1 e 2. Quindi: $m_C = m_1 + m_2$.

In termini delle masse m_1 e m_2 la relazione $\mathbf{a}_2 = -C_{12} \mathbf{a}_1$ si può scrivere $m_1 \mathbf{a}_1 = -m_2 \mathbf{a}_2$ o equivalentemente

$$m_1 \mathbf{a}_1 + m_2 \mathbf{a}_2 = \mathbf{0}$$

E' chiaro che il metodo usato per determinare la massa di un corpo, non può in ogni caso essere quello utilizzato da noi per definire il concetto di massa inerziale (in alcuni casi è necessario, in altri è scomodo). Comunemente il metodo più usato è basato sull'utilizzo della bilancia.

Ribadiamo che, con l'espressione "punto materiale di massa m " si intende un corpo di massa m le cui dimensioni lineari sono piccole rispetto alle altre lunghezze in gioco e la cui struttura interna non è importante per lo studio del moto, cosicché il corpo può essere schematizzato come un punto geometrico pur possedendo una certa massa.

U.D. 2

• Secondo principio di Newton

Se un corpo di massa m si muove di moto accelerato rispetto a un sistema di riferimento inerziale e a un certo istante la sua accelerazione è \mathbf{a} , si dice che il corpo è soggetto alla forza: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$

La relazione appena scritta costituisce la **definizione di forza**, che risulta così una grandezza derivata con dimensioni :

$$[F] \equiv [m][a] \equiv [M][L][T]^{-2}$$

Nel sistema MKS l'unità di misura dell'intensità di una forza è un'unità derivata: dalla relazione $F = ma$ segue che :

1 unità di mis. della forza = 1 unità di mis. della massa x 1 unità di mis. dell'accelerazione

Nel sistema MKS l'unità di misura dell'intensità della forza è *1Newton (1 N) = 1 kg x 1 m/s²*.

Il Newton (1 N) è l'intensità di una forza che agendo su un corpo di massa 1 kg gli imprime un'accelerazione di 1 m/s².

Consideriamo il caso di due soli corpi interagenti tra loro; sia m_1 la massa del primo corpo, chiamato corpo 1, che supporremo approssimabile a un punto materiale; sia \mathbf{a}_{12} l'accelerazione che esso possiede ad un certo istante a causa dell'interazione col secondo corpo (corpo 2); la quantità $\mathbf{F}_{12} = m_1\mathbf{a}_{12}$ è per definizione la forza agente sul punto materiale 1 all'istante considerato, forza dovuta alla presenza del secondo corpo.

Se allontaniamo il corpo 2 e facciamo interagire il corpo 1 con un altro corpo (che chiamiamo corpo 3), si può introdurre in maniera analoga la quantità $\mathbf{F}_{13} = m_1\mathbf{a}_{13}$.

A questo punto è naturale porsi il problema seguente:

facciamo interagire il corpo 1 contemporaneamente con i corpi 2 e 3; sia \mathbf{a}_1 l'accelerazione acquistata e $\mathbf{F}_1 = m_1\mathbf{a}_1$ la forza agente sopra esso. Quale relazione esiste tra \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_{12} e \mathbf{F}_{13} ?

L'esperienza ha costantemente confermato che, se più forze agiscono su un corpo, ciascuna produce l'accelerazione cui darebbe luogo agendo da sola (**principio dell'indipendenza delle azioni simultanee**). Nel caso prima considerato si ha:

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_{12} + \mathbf{a}_{13}$$

Naturalmente tale relazione è verificata entro i limiti degli errori sperimentali.

La relazione precedente, che coinvolge le accelerazioni, evidenzia il fatto che queste ultime sono grandezze vettoriali, e come tali vanno sommate con la consueta regola del parallelogrammo. Quella scritta sopra è dunque una relazione vettoriale.

Se adesso moltiplichiamo entrambi i membri per m_1 si ottiene:

$$m_1\mathbf{a}_1 = m_1\mathbf{a}_{12} + m_1\mathbf{a}_{13}$$

la quale è sempre una relazione vettoriale. Ma dalle definizioni delle forze prima scritte si ha che

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13}$$

Le forze si sommano dunque con la regola di addizione vettoriale e questo prova che le forze sono quantità vettoriali. La migliore prova del carattere vettoriale delle forze è costituita comunque dalla validità delle conseguenze di tale assunzione.

La forza risultante agente su un corpo è la somma vettoriale delle singole forze esercitate sul corpo dai diversi punti materiali che interagiscono con esso.

La relazione esistente tra la forza risultante \mathbf{F} , l'accelerazione \mathbf{a} e la massa m è dunque:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (*)$$

che traduce il seguente **Secondo principio di Newton**

In un sistema di riferimento inerziale, l'accelerazione di un punto materiale è direttamente proporzionale alla forza risultante su esso, e inversamente proporzionale alla massa del punto materiale.

Tale principio, come del resto l'equazione che lo traduce, ha validità generale, nell'ambito della Meccanica classica, se il moto viene studiato in un sistema di riferimento inerziale.

Nei casi di sistemi non inerziali, le cose si complicano notevolmente, ed è per questo che lasciamo alla dinamica dei moti relativi in sistemi non inerziali, tale trattazione.

Sul contenuto del secondo principio, possiamo fare alcune osservazioni:

- a) se a un corpo di massa m conosciuta (misurata in precedenza per esempio attraverso la definizione) si applicano successivamente diverse forze $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots$ di intensità nota, la

relazione $\mathbf{F}_i = m\mathbf{a}_i$ tra la forza applicata e l' accelerazione prodotta vale sempre con lo stesso valore della costante di proporzionalità m ;

- b) è vero che la (*) può essere utilizzata, noti m ed \mathbf{a} , per definire la forza \mathbf{F} ,ma senza il secondo principio di Newton, niente ci assicurerebbe a priori che tale forza \mathbf{F} applicata ad altri corpi produca accelerazioni in accordo alla (*) : questo è proprio il contenuto del secondo principio di Newton;
- c) quando su un corpo già in moto viene esercitata una forza \mathbf{F} , l' accelerazione \mathbf{F}/m da questa prodotta è indipendente dalla velocità posseduta in quell' istante dal corpo e va ad aggiungersi all' eventuale accelerazione dovuta ad altre forze (principio dell' indipendenza delle azioni simultanee);
- d) se più forze $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_n$ agiscono contemporaneamente su un corpo, l' accelerazione \mathbf{a} corrispondente è la stessa di quella che produrrebbe una sola forza $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$ uguale alla somma vettoriale delle forze considerate (le forze si sommano vettorialmente).

L' equazione vettoriale $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ si traduce nelle tre equazioni scalari

$$\begin{cases} F_x = ma_x \\ F_y = ma_y \\ F_z = ma_z \end{cases}$$

Si deve far notare che, nel caso $\mathbf{F} = \mathbf{0}$, dalla (*) segue che $\mathbf{a} = \mathbf{0}$, cioè la velocità del corpo è costante: il secondo principio di Newton è ovviamente compatibile col principio d' inerzia.

Nella trattazione del secondo principio della dinamica si può descrivere in classe un' esperienza realizzata con un disco a ghiaccio secco. Una volta descritta l'esperienza e forniti i dati raccolti dalle osservazioni, si possono studiare i dati, realizzare un grafico che li descriva e fare le opportune considerazioni. Queste ultime si possono poi confrontare con i contenuti della parte formale.

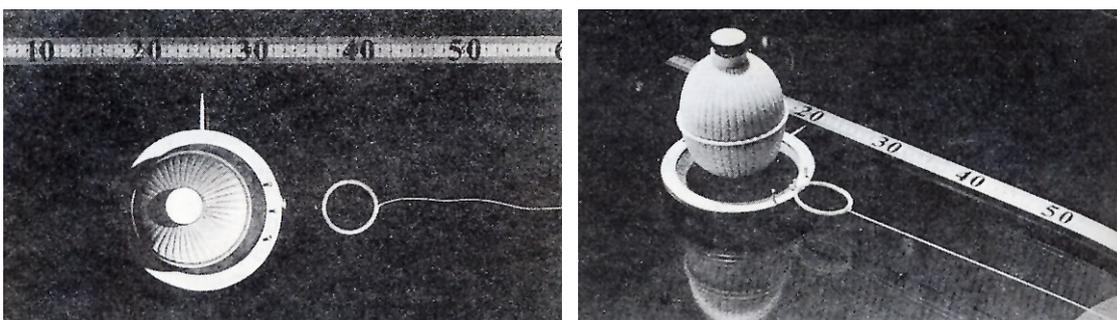
In una formulazione corretta del secondo principio è necessario il riferimento ai sistemi inerziali, dunque al principio di inerzia; non è un caso dunque che il primo principio preceda il secondo.

Ai fini della dinamica di una particella è invece chiaro come il secondo rivesta un ruolo fondamentale; è grazie ad esso che conoscendo masse, posizioni, velocità iniziali, forze, possiamo ricavare le equazioni del moto (da qui il termine "legge fondamentale della dinamica").

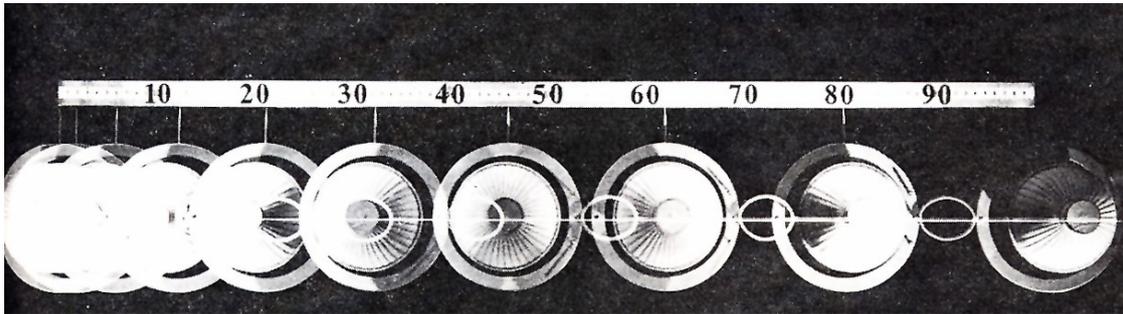
C'è poi un'altra ragione per separare i due principi: il primo non implica il secondo; sono infatti possibili teorie dinamiche (vedi relatività ristretta) in cui vale il primo principio ma il secondo deve essere riformulato.

Abbiamo visto che applicando una forza ad un corpo, provochiamo una variazione della velocità (in intensità, direzione e verso) del corpo stesso (esperienza del piano a cuscino d' aria); in altre parole produciamo una accelerazione dell'oggetto. Vogliamo renderci conto in maniera diretta che relazione c'è fra la forza e l'accelerazione. Analizziamo il moto di un oggetto sul quale agisce una forza (sempre approssimativamente) costante.

Consideriamo un disco a ghiaccio secco su cui esercitiamo una forza, tirandolo con un filo. Per valutare l'intensità della forza mettiamo un elastico tra il disco e la corda. Se vediamo che l'elastico è sempre allungato nello stesso modo possiamo essere "sicuri" che la forza che stiamo applicando è costante (naturalmente questa è un' approssimazione).



Mentre eseguiamo l'esperimento, fotografiamo le posizioni successive del disco, illuminandolo con un flash intermittente a intervalli di tempo regolari.

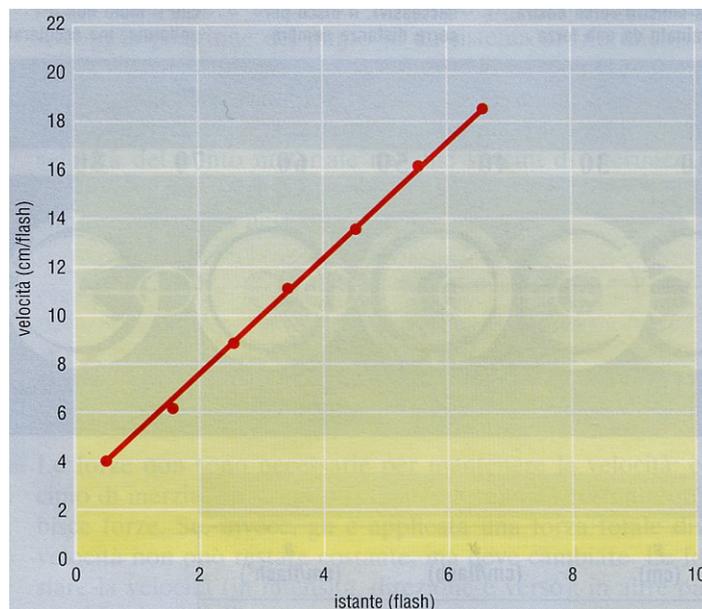


Vediamo la sequenza degli scatti del disco a ghiaccio secco ripreso mentre si muove da sinistra verso destra, trainato da una forza costante. Tra due flash successivi, il disco percorre sempre distanze più grandi. Ciò significa che il moto non è uniforme, ma accelerato.

Riportiamo i dati in una tabella, utilizzando un foglio elettronico. Si può scegliere come unità di misura del tempo l'intervallo tra un lampo e l'altro del flash, che corrisponderà ad un certo valore espresso in secondi.

Si procede calcolando le velocità medie fra due flash successivi che può essere ragionevolmente considerata un' approssimazione della velocità istantanea del disco nell'istante medio tra due flash successivi. Lo stesso discorso vale per le accelerazioni medie. (Osserviamo che velocità e accelerazioni medie presentano unità di misura non convenzionali; è possibile, conoscendo il valore in secondi di "1 flash", convertire tutto nel sistema MKS. Tuttavia ciò è inutile ai nostri scopi)

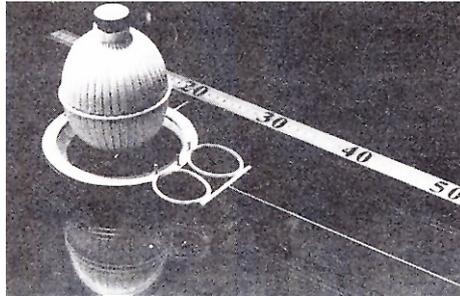
Riportiamo i dati della tabella su un sistema di riferimento velocità-tempo. Tenendo conto degli errori sperimentali otteniamo un grafico di questo tipo



Vediamo che i dati stanno tutti approssimativamente, su un tratto di retta. Cosa significa questo? Che il moto è uniformemente accelerato, cioè l'accelerazione è costante nel limite degli errori sperimentali. Faremo osservare che la tabella conferma la nostra ipotesi. Infatti, considerando gli errori sperimentali, l'accelerazione risulta costante.

Possiamo quindi concludere che una **forza costante provoca un'accelerazione costante, che ha la stessa direzione e verso della forza.**

Se ora applichiamo a uno stesso oggetto forze diverse, la sua accelerazione cambia. E' facile immaginare che l'accelerazione sia tanto più grande quanto maggiore è la forza (questo lo sappiamo già, ma non abbiamo ancora notato l' evidenza sperimentale di questo fatto). Ma questo non ci basta. Vogliamo trovare la relazione quantitativa che intercorre tra forza e accelerazione. Applichiamo al disco a ghiaccio secco una forza doppia di quella precedente e manteniamola costante nel tempo. Per essere sicuri che si tratta di una forza doppia possiamo usare due elastici invece di uno, e li tendiamo in modo che si allunghino esattamente come nell'esperimento precedente.



Il disco si muove ancora di moto uniformemente accelerato, ma il valore misurato dell'accelerazione risulta essere il doppio di quello che corrisponde alla forza di un elastico. Se triplichiamo la forza, usando tre elastici, l'accelerazione triplica e così via. Scopriamo così che **l'accelerazione è direttamente proporzionale alla forza.** Cioè:

$$\frac{F}{a} = \text{cost.}$$

Possiamo utilizzare foglio elettronico, tabelle e grafici analoghi a quelli usati in precedenza.

Se ora invece di raddoppiare la forza, raddoppiamo la massa, collegando insieme più dischi, si osserva che mantenendo costante la forza, l'accelerazione dimezza. (quindi $\frac{F}{a}$ raddoppia come la

massa). In modo analogo con tre dischi l'accelerazione diventa un terzo (quindi $\frac{F}{a}$ triplica come la massa). Perciò **l'accelerazione è inversamente proporzionale alla massa.**

Combinando queste osservazioni si ottiene:

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

Riordinando i termini dell'equazione si arriva alla forma:

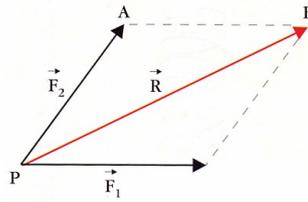
$$F = m \cdot a$$

Essa esprime il secondo principio di Newton (di cui abbiamo già visto la trattazione) . In un sistema di riferimento inerziale l'accelerazione di un corpo è in ogni istante direttamente proporzionale alla risultante delle forze applicate ad esso, e inversamente proporzionale alla propria massa.

- **Risultante di forze e schemi del corpo libero**

Abbiamo definito la **risultante** di più forze che agiscono su un corpo, come la somma vettoriale di tutte le forze agenti sul corpo stesso. Quando ci si ritrova di fronte alla necessità di sommare vettorialmente più forze è meglio iniziare eseguendo un disegno che indichi ognuna delle forze esterne agenti sul corpo stesso: tale disegno è detto **schema del corpo libero**.

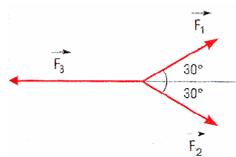
Se ci si occupa di moti non rotazionali, possiamo trattare l'oggetto come un punto materiale e applicare ciascuna forza a questo punto. In questo modo, utilizzando le regole di composizione dei vettori, possiamo sommare le forze per ottenere un'unica forza che chiamiamo **risultante** e indichiamo con $\sum F$ oppure F_{tot} .



Esempi :

1. Trova la risultante di due forze aventi lo stesso punto di applicazione e lo stesso valore $F = 5N$ nei seguenti casi:
 - a. Le due forze hanno la stessa direzione e verso
 - b. Le direzioni delle due forze formano un angolo di 90°
 - c. Le due forze hanno la stessa direzione e verso opposto

2. Un corpo sta viaggiando alla velocità costante di 30 m/s. Se su di esso agissero contemporaneamente le tre forze mostrate in figura, il corpo continuerebbe a viaggiare con velocità costante?



Dalle precisazioni fatte, arriviamo all'enunciato formale della **seconda legge di Newton**:

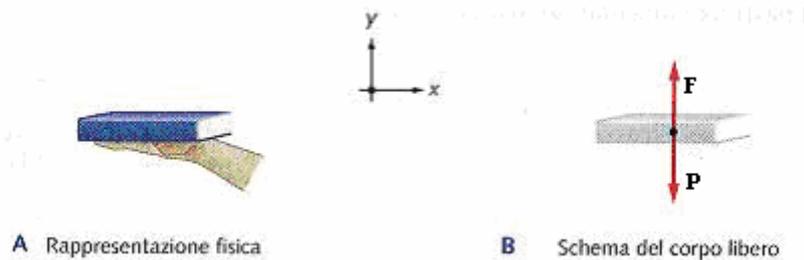
$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

Applichiamo questo procedimento a un semplice esempio unidimensionale. Supponiamo di tenere un libro in mano. Qual è l'intensità della forza verso l'alto che la nostra mano deve esercitare per mantenere il libro fermo? Dall'esperienza quotidiana ci aspettiamo che la forza verso l'alto debba essere uguale, in modulo, al peso del libro, ma proviamo a vedere come questo risultato si possa ottenere direttamente dalla seconda legge di Newton.

Facciamo un disegno della situazione fisica. Il corrispondente schema del corpo libero mostra il libro, rappresentato da un punto, e le forze che agiscono su di esso. Notiamo che sul libro agiscono due forze:

- la forza di gravità, \mathbf{P} , verso il basso;

- la forza, \mathbf{F} , verso l'alto, esercitata dalla nostra mano.



(si noti la scelta del sistema di riferimento che verrà fra un attimo giustificata, e che il concetto di “forza peso” è ancora inteso intuitivamente)

Soltanto le forze che agiscono sul libro vengono incluse nello schema del corpo libero. (Nel senso che tutte le altre vengono trascurate, in quanto non sono determinanti in relazione alla situazione che dobbiamo studiare)

Ora che lo schema del corpo libero è disegnato, individuiamo un sistema di coordinate che ci permetta di scomporre le forze nelle loro componenti. In questo caso tutte le forze sono verticali, perciò disegniamo l'asse y nella direzione verticale e scegliamo come positivo il verso in alto. Con questa scelta, le componenti y delle forze sono $F_y = F$ e $P_y = -P$. Ne consegue che:

$$\sum F_y = F - P$$

Utilizzando la seconda legge relativa alla componente y ($\sum F_y = m \cdot a_y$) troviamo:

$$F - P = m \cdot a_y$$

In cui m e a_y rappresentano la massa e la componente lungo l'asse y dell'accelerazione, del corpo.

Poiché il libro rimane fermo, la sua accelerazione è **zero**. Perciò $a_y = 0$, che ci dà:

$$F - P = m \cdot a_y = 0 \quad (\text{oppure}) \quad F = P$$

come ci aspettavamo.

Osserviamo che il precedente esempio rappresenta solo uno degli infiniti casi di applicazione dello schema del corpo libero. Aggiungiamo che è opportuno proporre esempi anche bidimensionali, per evidenziare l'universalità del metodo. Quando si parlerà della forza peso, è utile riprendere l'esempio precedente del libro; tale situazione immediata ed intuitiva può aiutare a farsi un'idea sull'entità dell'unità di misura della forza. (1 N è “grande” oppure “piccolo” ?.....)

• Principali tipi di forze

Premessa : la seguente trattazione è puramente descrittiva, e ha come obiettivo quello di illustrare le principali caratteristiche di alcune forze che possiamo incontrare nella vita di tutti i giorni. La trattazione completa di tali argomenti, richiede lo sviluppo di U.D. dedicate.

La forza peso

La velocità di un corpo lanciato verticalmente verso l'alto diminuisce in modulo fino ad annullarsi, quindi cambia verso e il suo modulo ricomincia a crescere :il corpo è dunque soggetto a una forza

verticale, diretta verso il suolo, che lo rallenta e lo fa ricadere a terra. Si verifica sperimentalmente che nel vuoto, o quando la resistenza dell'aria può venire trascurata, il moto di ogni corpo risulta uniformemente accelerato con accelerazione verticale diretta verso il basso (è un fatto, questo, verificabile in laboratorio, e per la prima volta osservato da Galileo): tale accelerazione viene chiamata accelerazione di gravità e indicata col simbolo **g**. Nelle immediate vicinanze della superficie terrestre il valore di $g = |\mathbf{g}|$ è approssimativamente 9.8 m/s^2 ; per verificare la validità delle affermazioni precedenti, basta misurare le distanze percorse a istanti diversi e verificare che valgono le leggi del moto uniformemente accelerato. A causa dell'elevato valore di **g** e della conseguente rapida crescita della velocità del corpo, per ridurre gli errori nelle misure conviene ricorrere a speciali artifici coi quali, senza alterare la natura del moto, si rallenta la velocità del corpo. A tale scopo si può usare un piano inclinato (nei calcoli occorre sapere la trigonometria) oppure la macchina di Atwood, la quale sfrutta una carrucola di massa trascurabile, un filo inestensibile, due corpi aventi la stessa massa (nota) e due piatti mobili su di una scala graduata. Si tratta di calcolare l'accelerazione dei due corpi, supponendo trascurabili tutti i possibili attriti. Si trova che, se **a** indica l'accelerazione di un corpo in caduta libera (cioè, vengono trascurati tutti gli attriti), vale la relazione

$$\mathbf{a} = \mathbf{g}$$

e poichè per il secondo principio di Newton è $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$, la forza che in questo caso agisce sul corpo, e che si chiamerà forza peso (o peso del corpo), risulta:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g}$$

Dall'equazione sopra scritta segue che un corpo di massa $m = 1 \text{ kg}$ in vicinanza della superficie terrestre, ha peso (approssimativamente)

$$mg = 1 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 9.8 \text{ N}$$

L'accelerazione di gravità varia da punto a punto dello spazio. Di conseguenza anche il peso di un corpo varia da punto a punto dello spazio.

Le variazioni di g , in parte si possono attribuire alla variazione della distanza del corpo dal centro della Terra; altre cause possono essere dovute alla variazione della densità media della Terra (tra le altre cose, proprio sfruttando tale "principio", si possono trarre informazioni sulla natura del sottosuolo, in ricerche geofisiche); la causa principale delle variazioni di g è comunque da ricercare nella rotazione terrestre, la quale provoca una differenziazione riferita al parametro della latitudine. Un'unità didattica esclusivamente dedicata alla gravitazione terrestre ed ai suoi effetti, è certamente più indicata per descrivere il fenomeno. E' per questo che concludiamo quest'antepima con una tabella che presenta i valori di g a diverse latitudini ed a varie altezze dal suolo.

Valori di g .

Latitudine	$g(\text{m/s}^2)$	Altezza (m)	$g(\text{m/s}^2)$
0°	9.78039	0	9.80171
10°	9.78195	500	9.80017
20°	9.78641	1000	9.79864
30°	9.79329	2000	9.79554
40°	9.80171	4000	9.78937
50°	9.81071	8000	9.77702
60°	9.81918	16000	9.75233
70°	9.82608	32000	9.70296
80°	9.83059		
90°	9.83217		

Le forze di attrito

Le forze di attrito si manifestano quando si cerca di spostare un corpo lungo la superficie (di qualunque tipo: solida, liquida, gassosa) con la quale esso è a contatto. Infatti per mettere in movimento un corpo occorre applicargli una forza di intensità sufficientemente grande per vincere la forza di attrito (attrito statico). Ma di questo fatto ce ne siamo accorti in prima persona nel corso delle esperienze di laboratorio. Ci siamo anche accorti che, quando il corpo è in movimento, per mantenere costante la velocità è necessaria una forza opposta alla forza di attrito (attrito dinamico). Possiamo anche intuire che la forza che abbiamo dovuto esercitare per mettere in moto l'oggetto, è maggiore di quella necessaria per mantenerne inalterato il moto.

Le forze di attrito hanno rappresentato una delle principali cause delle difficoltà dello studio, avvenuto nei secoli, di ciò che avrebbe preso il nome di Meccanica classica. In quanto non si può prescindere da esse, e seminano continuamente falsi indizi. Lo si vedrà anche nella trattazione del terzo principio.

Forze gravitazionali

Il problema di partenza che condusse Newton a formulare la legge di gravitazione universale fu sostanzialmente il seguente: " Quali forze esercita il Sole sui pianeti per farli muovere in accordo alle leggi di Keplero ? " Per rispondere a questa domanda Newton trovò particolarmente utile considerare il moto di rivoluzione della Luna attorno alla Terra e utilizzare i dati disponibili su tale movimento. Sulla Luna deve agire una forza, altrimenti essa si muoverebbe di moto rettilineo uniforme; ma qual' è questa forza? In seguito al famoso aneddoto della mela, egli pensò che il peso, responsabile della caduta dei gravi verso il suolo, poteva essere responsabile del moto della Luna. La Luna non cade sulla Terra perchè la forza in questo caso, produce un' accelerazione centripeta, cioè è la causa della variazione di direzione di velocità presente nel moto circolare della Luna. L' accelerazione centripeta della Luna (in quanto stima) risultava essere molto inferiore di g , di conseguenza Newton fu portato a supporre che la forza gravitazionale che si esercita tra due corpi abbia intensità dipendente dalla loro distanza. Per spiegare, però, i dati astronomici a disposizione risultò necessario ammettere una dipendenza inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Maggiori dettagli saranno poi dati in un' altra U.D.

Si arriverà alla conclusione che:

ogni particella materiale attira ogni altra particella materiale (e viceversa) con una forza gravitazionale diretta secondo la retta passante per le due particelle e di intensità

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

dove m_1 e m_2 sono le masse gravitazionali (si veda il paragrafo successivo) delle due particelle, r la loro distanza e G è la costante di gravitazione universale. (senza aggiungere ulteriori dettagli) Dopo la trattazione del terzo principio, si può tornare su questa legge per cercare di ragionare un po', soprattutto sulla proporzionalità inversa tra F ed r^2 .

Forze di deformazione

Quando si vuole modificare la forma di un corpo, cambiandone o no il volume, sono necessarie delle forze di intensità dipendenti dalla misura del cambiamento che si vuole produrre, e dallo stato di aggregazione del corpo considerato.

Le **forze elastiche** sono un esempio particolare di forze di deformazione.

Si possono fare infiniti esempi di applicazioni relative a queste forze.

Passando dalla Meccanica ad altri rami della fisica, le forze più importanti sono certamente le forze elettriche e le forze magnetiche.

Forse, a questo punto, è un po' prematuro andare oltre.

Nota: nell' esempio della forza gravitazionale, compaiono le masse gravitazionali delle particelle prese in esame. La domanda sorge spontanea: che differenza c' è tra massa inerziale e massa gravitazionale ?

La trattazione prossima della distinzione tra forza inerziale e gravitazionale non ha la pretesa di affrontare il problema in modo esauriente. Sicuramente per capire meglio il problema bisogna studiare la forza gravitazionale spiegando l'esperimento di Cavendish. Questa digressione serve solo a completare il discorso relativo alla massa. Inoltre l'introduzione della legge di gravitazione universale dovrebbe favorire una migliore comprensione della forza peso e del suo legame con la massa inerziale.

- **Massa inerziale e massa gravitazionale**

Ragioniamo ora sul concetto di massa. Abbiamo inizialmente definito la massa come la "quantità di materia costituente un corpo". Abbiamo definito la massa inerziale attraverso l' esperienza del rapporto costante tra le accelerazioni dei carrelli. Analizzando poi il secondo principio di Newton abbiamo visto che, in un corpo soggetto a forze, il rapporto fra la risultante delle forze che agiscono sul corpo e l'accelerazione che esse gli impartiscono è proprio la massa inerziale del corpo stesso:

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

Quindi maggiore è la massa e minore è l'accelerazione del punto materiale (a parità di forza applicata).

La **massa** quindi è una proprietà del corpo che esprime una misura dell'inerzia del corpo stesso, cioè una resistenza che esso presenta ad assumere un'accelerazione sotto l'azione di una forza. Per questo motivo la massa prende il nome di **massa inerziale**.

Nell' analisi qualitativa di alcuni dei principali tipi di forze, abbiamo accennato alla legge di gravitazione universale.

Ogni corpo è caratterizzato da una grandezza fisica detta **massa gravitazionale** che misura la capacità che ha un corpo di attrarre un altro corpo, secondo una legge sperimentale:

$$F = G \cdot \frac{m_{g1} m_{g2}}{r^2}$$

dove:

m_{g1} e m_{g2} sono le masse gravitazionali dei due corpi

r è la distanza fra i corpi

G è detta costante di gravitazione universale.

Questa è la forza con cui la Terra attrae i corpi verso il suo centro. Essa è direttamente proporzionale alle masse gravitazionali e inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i due corpi.

A questo punto è lecito chiedersi che relazione ci sia fra massa inerziale (che misura la "resistenza" di un corpo soggetto a forze, ad accelerare) e la massa gravitazionale (la misura della capacità di un corpo di attrarre altri corpi)?

Inerzia e gravitazione sono due fenomeni fisici diversi e diverse sono le grandezze che li caratterizzano.

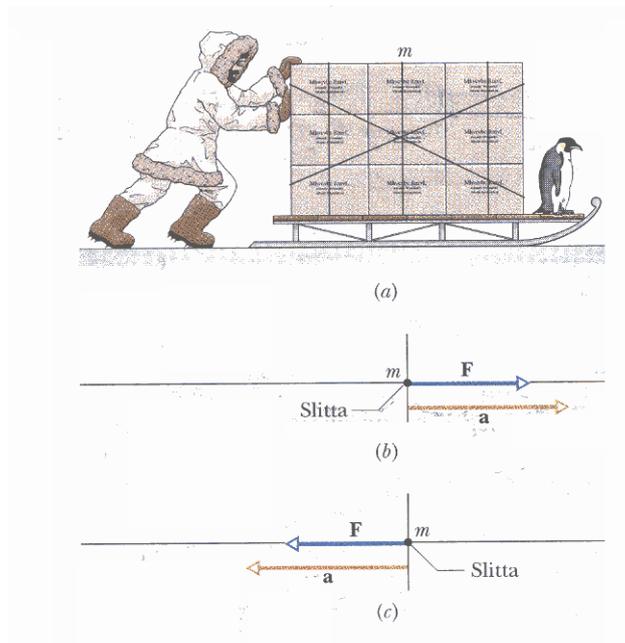
E' possibile verificare sperimentalmente che le due grandezze (massa inerziale e massa gravitazionale) sono proporzionali, e quindi è possibile identificarle utilizzando per entrambe la stessa unità di misura.

Ciò significa che il blocco campione di platino - iridio è allo stesso tempo l'unità di misura della massa gravitazionale e della massa inerziale.

Esempi di applicazione dei concetti studiati

Esercizio 1:

Un eschimese spinge una slitta di massa $m=240\text{ kg}$ per $2,3\text{ m}$ lungo la superficie priva di attrito di un lago ghiacciato. Egli esercita una forza orizzontale costante di 130 N (figura 4.). Se la slitta parte da ferma, qual è la sua velocità finale?



Risoluzione: Consideriamo la slitta come una particella puntiforme e l'asse x orizzontale diretto verso destra. In figura è rappresentato il diagramma parziale delle forze applicate alla slitta (le due forze verticali qui non sono considerate, poiché non influenzano la soluzione del problema). Supponiamo dunque che l'unica forza agente sulla slitta sia la forza F esercitata dall'eschimese. Applichiamo la seconda legge di Newton e calcoliamo l'accelerazione della slitta:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{130\text{ N}}{240\text{ kg}} = 0,54\text{ m/s}^2$$

Poiché l' accelerazione è costante, per calcolare la velocità finale possiamo usare l' equazione del moto uniformemente accelerato e ricavare che $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$, ponendo $v_0 = 0$ e $x - x_0 = d$ e ricavando v , otteniamo:

$$v = \sqrt{2ad} = \sqrt{2 \cdot 0,54 \cdot 2,3} \text{ m/s} = 1,6 \text{ m/s}$$

Osserviamo che la forza, l' accelerazione, lo spostamento e la velocità sono tutte positive, cioè questi vettori sono tutti diretti verso destra.

Esercizio 2:

Supponiamo ora che l' eschimese dell' esercizio precedente voglia invertire il moto della slitta in 4,5 s. Per ottenere tale risultato, quale forza deve applicare alla slitta?

Risoluzione: Il secondo diagramma delle forze rappresenta la forza agente sulla slitta quando l' eschimese spinge nella direzione opposta.

Determiniamo l' accelerazione costante usando l' equazione $v = v_0 + at$, ricavando a si ottiene

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{-1,6 - 1,6}{4,5} \text{ m/s}^2 = -0,71 \text{ m/s}^2$$

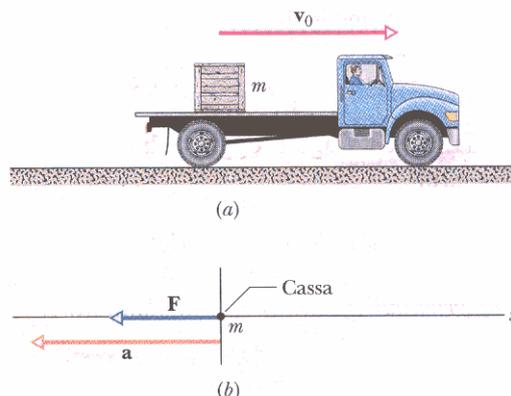
Il suo modulo è maggiore del valore calcolato nell' esercizio 1. per cui l' eschimese deve spingere più forte di prima. Per calcolare la forza F' , usando sempre l' equazione del moto, si ha

$$F' = ma = 240 \cdot (-0,71) \text{ N} = -170 \text{ N}$$

Il segno negativo dimostra che l' eschimese deve spingere la slitta nella direzione delle x decrescenti e cioè a sinistra.

Esercizio 3.:

Una cassa di 360 kg è posta su un camion che viaggia alla velocità di 120 km/h (figura 5.). Il guidatore frena fino ad arrivare in 17 s a 62 km/h. Quale forza (supposta costante) agisce sulla cassa durante questo intervallo di tempo? Supporre che, durante la frenata, la cassa non slitti sul camion.



Risoluzione: Determiniamo l' accelerazione (costante) della cassa. Otteniamo

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{62 - 120 \text{ km/h}}{17 \text{ s}} = -0,95 \text{ m/s}^2$$

Avendo fissato come positiva la direzione verso destra, l' accelerazione è diretta a sinistra, avendo segno negativo.

La forza agente sulla cassa viene quindi ricavata dalla seconda legge di Newton

$$F = ma = 360 \cdot (-0,95) \text{ N} = -340 \text{ N}$$

Questa forza è diretta come l' accelerazione, cioè verso sinistra. Come tutte le forze, deve essere applicata da un agente esterno, per esempio da un qualsiasi mezzo necessario a fissare la cassa al camion. Se la cassa non è ancorata al camion, allora la forza necessaria a decelerare la cassa potrebbe essere la forza di attrito tra cassa e camion.

U.D. 3

• Terzo principio di Newton

Abbiamo visto che quando, in un sistema di riferimento inerziale, due punti materiali interagiscono esclusivamente tra loro, qualunque sia il tipo di interazione (elettrica, gravitazionale, urto, ecc...) vale la relazione

$$m_1 \mathbf{a}_1 = - m_2 \mathbf{a}_2 \quad (*)$$

Quindi, quando due punti materiali interagiscono esclusivamente tra loro, se a un certo istante il primo corpo possiede un' accelerazione \mathbf{a}_1 , il secondo corpo possiede un' accelerazione $\mathbf{a}_2 = - (m_1 / m_2) \mathbf{a}_1$.

Il corpo 1 si muove con accelerazione \mathbf{a}_1 sotto l' azione della forza $\mathbf{F}_{12} = m_1 \mathbf{a}_1$ dovuta all' interazione col secondo corpo, cioè alla forza \mathbf{F}_{12} che quest' ultimo esercita sul corpo 1 ; analogamente il corpo 2, a causa della presenza del corpo 1, viene a possedere un' accelerazione \mathbf{a}_2 , cioè risente una forza $\mathbf{F}_{21} = m_2 \mathbf{a}_2$. In termini di \mathbf{F}_{12} e \mathbf{F}_{21} la (*) si scrive :

$$\mathbf{F}_{12} = - \mathbf{F}_{21}$$

Relazione che esprime il seguente

Terzo principio di Newton : se un punto materiale esercita una forza su un secondo punto materiale, quest' ultimo esercita sul primo una forza opposta e di uguale intensità.

I punti di applicazione delle forze sono i punti materiali, inoltre le forze sono dirette secondo la retta passante per i punti considerati, come si vede in figura.



Le due forze che intervengono nell' interazione tra due corpi vengono spesso chiamate "azione" e "reazione" : questo però non implica alcuna differenza nella loro natura, o che una forza sia la causa e l' altra il suo effetto. Il terzo principio di Newton viene chiamato anche **principio di azione e reazione.**

Il fatto che in figura l' interazione sia di tipo attrattivo, è puramente esemplificativo.

Per capire meglio questo principio consideriamo alcuni esempi e studiamo le forze agenti sugli oggetti in esame. Per fare questo è meglio disegnare un **diagramma di forza.**

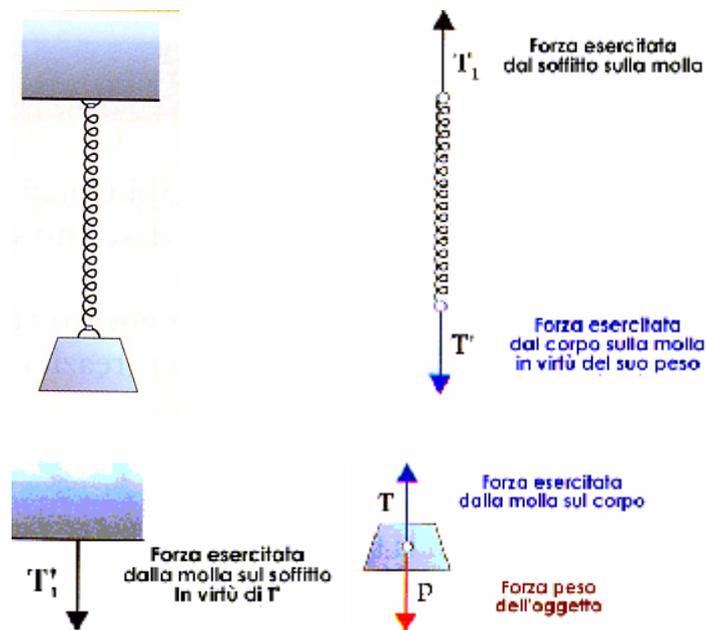
Bisogna fare molta attenzione nel disegnare tutte le forze e attribuirle ai giusti corpi. A differenza del diagramma del corpo libero in cui si considerano le forze applicate ad un solo corpo, in un diagramma di forze per la descrizione del terzo principio avremmo a che fare con diversi corpi e forze, quindi sbagliare è molto facile. Per limitare i problemi è meglio seguire alcuni suggerimenti:

In ogni interazione importante devono essere mostrati entrambi gli oggetti: nel caso di un libro appoggiato su un tavolo bisogna mostrare in due disegni separati sia il libro che il tavolo anche se la nostra attenzione è rivolta al libro. Deve essere mostrata la coppia di forze tra il libro e la superficie del tavolo dovuta alla terza legge, ogni forza nel suo diagramma appropriato. Questo per abituarti a capire a quale oggetto è applicata un determinata forza.

Ogni forza deve essere descritta a parole. Esempio: "forza gravitazionale esercitata dalla Terra sul libro". Può essere utile mettere in evidenza le coppie di forze dovute alla terza legge utilizzando per esempio colori diversi.

Un esempio:

un corpo sostenuto da una molla fissata al soffitto. Rappresentiamo tutte le forze:



• **Peso**

Abbiamo già precisato che tutti i corpi in prossimità della superficie terrestre sono attratti da una forza che li accelera verso il basso. Abbiamo anche spiegato che questo è causato dalla reciproca attrazione di due corpi dovuta alla legge di gravitazione universale che dipende dalle masse gravitazionali dei corpi stessi. Abbiamo poi visto che massa gravitazionale e inerziale sono tra loro proporzionali e quindi possiamo considerarle "uguali" in termini di unità di misura.

Poiché il secondo principio è valido per qualsiasi moto, esso vale anche per la caduta dei gravi nel vuoto. In tal caso la forza agente sul corpo di massa m è il suo peso P e, essendo l'accelerazione quella di gravità $g = 9,8m / s^2$, si ottiene:

$$\mathbf{P} = m \mathbf{g}$$

Inoltre, poiché in uno stesso luogo l'accelerazione di gravità è la stessa per tutti i corpi, ne deriva che, in uno stesso luogo, corpi di uguale massa hanno anche lo stesso peso e, più in generale, che il peso è direttamente proporzionale alla massa.

Pertanto il confronto dei pesi eseguito con la bilancia diventa anche il confronto delle masse. Tale metodo di misura può però adottarsi soltanto in presenza della gravità, mentre la misura della massa come rapporto tra forza applicata ed accelerazione prodotta può essere eseguita ovunque, anche in assenza di gravità.

Tutto questo potrebbe generare una confusione tra massa e peso, che anzi sono concetti profondamente diversi; oltre tutto la massa è una grandezza scalare mentre il peso, in quanto forza, è una grandezza vettoriale.

Inoltre il peso, a differenza della massa (che è una proprietà intrinseca del corpo) varia con la posizione del corpo sulla Terra, in quanto varia l'accelerazione di gravità. Così, se in una regione dello spazio si annulla l'effetto della gravità, si annulla anche il peso del corpo, mentre l'effetto inerziale, cioè la massa del corpo, rimane sempre inalterato, invariante e indipendente dalla sua posizione.

La costanza della massa implica che è necessaria sempre la stessa forza per produrre la stessa accelerazione su un blocco di ghiaccio (ad esempio) sia che questo si trovi sulla Terra, sia che si trovi sulla Luna, anche se il suo peso è notevolmente diverso nei due casi.

• Misura statica delle forze

Si è detto che le forze sono grandezze vettoriali. E necessario specificare quindi anche verso e punto di applicazione.

Se una forza viene applicata ad un punto materiale di massa nota m , dalla misura dell'accelerazione e attraverso la relazione $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ si ricava la misura della forza in questione; in particolare, la direzione e il verso di \mathbf{F} coincidono con quelli di \mathbf{a} . La misura realizzata in questo modo è una misura dinamica: tuttavia, tale metodo risulta conveniente solo in situazioni particolari (ad esempio l'urto tra due corpi) ed è ovviamente il solo possibile per una misura diretta in caso di forze dipendenti dalla velocità.

In molti casi la misura di una forza può farsi staticamente equilibrando la forza incognita con una forza nota, per mezzo di un dinamometro o di una bilancia: nel primo caso la forza da misurare provoca l'allungamento di una molla e viene equilibrata dalla forza elastica sviluppata dalla molla; nel secondo caso la forza viene equilibrata con opportune forze peso.

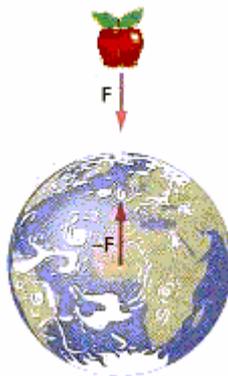
Bisogna osservare che tra il peso \mathbf{P} e la massa m di un corpo intercorre la relazione $m = P/g$, quindi un apparecchio per la misurazione dei pesi dei corpi, fornisce indirettamente anche la misura delle masse; in particolare, tra i pesi P_1 , P_2 e le masse m_1 e m_2 di due corpi intercorre la relazione

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

di conseguenza, un apparecchio in grado di confrontare i pesi confronta anche le masse e quindi può essere utilizzato per la misura diretta delle masse stesse. Lo strumento che meglio si presta a tale scopo è la bilancia; essa permette una misurazione accurata e semplice. Si può anche osservare che è più conveniente considerare le bilance come apparecchi per la misura delle masse, rispetto alla misura dei pesi: questo a causa del diverso valore che ha l'accelerazione di gravità in base al luogo in cui si trova il corpo. Gli schemi ed i principi di funzionamento della bilancia a bracci uguali e del dinamometro sono presenti in tutti i testi presi in esame.

• Interazione gravitazionale

Consideriamo l'interazione tra la Terra e una mela. Per il terzo principio di Newton la Terra attrae la mela, la quale a sua volta attrae la Terra con una forza opposta. Naturalmente i due corpi, a causa delle masse notevolmente diverse, reagiscono all'azione delle forze in modo differente; la Terra, rispetto a un osservatore esterno, per esempio collegato con la Luna, è praticamente insensibile all'azione della forza. Questo accade sempre quando la massa inerziale di un corpo è enormemente più grande di quella dell'altro; il diverso modo di comportarsi deriva dalla diversa inerzia presentata dai due corpi; le forze, al contrario, sono uguali. L'esempio della mela e della Terra può essere esteso a due corpi qualsiasi, come per esempio Luna e Terra oppure Sole e Terra. Le forze che i due corpi esercitano l'uno sull'altro sono sempre opposte e sulla stessa retta d'azione. **Vogliamo anche notare semplicemente che “azione e reazione”, in quanto sono forze applicate a corpi diversi, non si equilibrano.**



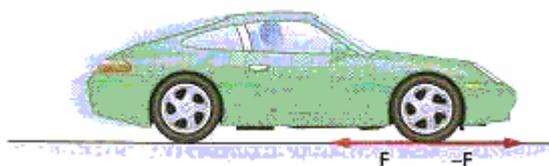
E' meglio calcolare esplicitamente le due accelerazioni e far vedere che effettivamente il moto della Terra può essere trascurato rispetto a quello del corpo in caduta libera.

Molti studenti, acquisiscono l'informazione secondo cui l'aria preme le cose verso il basso e traducono questo associandolo con la gravità, vista come una spinta verso il basso piuttosto che una forza di attrazione. La gravità quindi scompare quando si toglie l'aria. Molti credono che gli oggetti si mettano a fluttuare se posti in una campana sotto vuoto. Questo ci può dare lo spunto iniziale per trattare in futuro l'argomento della caduta libera e per far vedere per l'ennesima volta gli effetti ingannevoli delle forze d'attrito.

(Un altro esempio :

Consideriamo un'automobile che accelera da ferma. Non appena il motore dell'automobile fa girare le ruote, i pneumatici esercitano una forza sulla strada. Per la terza legge, la strada esercita una forza uguale e contraria sui pneumatici dell'auto. È questa seconda forza che, agendo sull'automobile attraverso i suoi pneumatici, la spinge in avanti.

Poiché le forze d'interazione agiscono su oggetti differenti, generalmente producono accelerazioni molto diverse.)

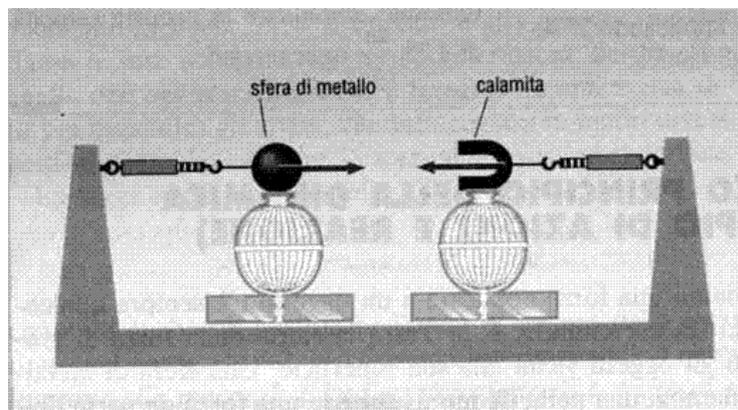


Con un apparato sperimentale abbastanza semplice, è facile rendersi conto del significato del terzo principio. Si tratta di una calamita che attrae una sfera di metallo. Queste ultime sono connesse a due dischi a ghiaccio secco ed a due dinamometri collegati alle pareti del recipiente che contiene tutti questi oggetti.

A prima vista viene da pensare che la forza agisca in un solo senso, dalla calamita sulla sferetta. E in effetti, se mettiamo questi due oggetti (senza i dischi) sopra un tavolo a distanza ravvicinata, chi si mette in movimento è la sfera di metallo e non la calamita (molto probabilmente). Ancora una volta sono le forze di attrito che seminano indizi falsi e fuorvianti.

Ripetendo l'esperienza utilizzando i dischi a ghiaccio secco, osserviamo che entrambi gli oggetti si mettono in movimento; se poi andiamo a leggere la scala graduata del dinamometro, ci accorgiamo che le forze hanno la stessa intensità.

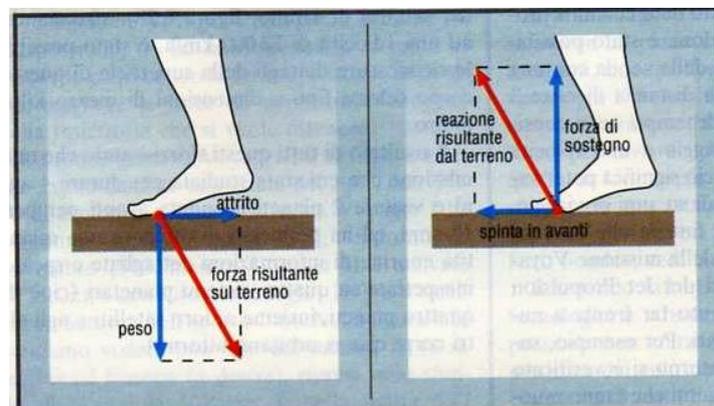
Proviamo a ripetere l'esperienza con sferette e calamite diverse; otterremo sempre letture coincidenti sui dinamometri.



Questo è un esempio riproducibile in laboratorio dell'evidenza sperimentale del terzo principio di Newton.

• Il terzo principio e la locomozione

Sul terzo principio della dinamica si fondano numerosi sistemi di locomozione. Quando camminiamo "spingiamo indietro il terreno" e riceviamo dal suolo una spinta in avanti che ci fa muovere.



Anche un'automobile spinge indietro il terreno con le ruote, per essere poi spinta in avanti. Ed è l'attrito tra ruota e terreno che impedisce alla ruota di "scivolare" e quindi fa avanzare l'automobile.

- **Peso apparente**

Facciamo alcune **osservazioni**:

1. Noi non avvertiamo direttamente la forza di gravità. Quando cadiamo non sentiamo qualcosa che ci tira giù.
2. Ciò che in realtà avvertiamo o sentiamo è la forza esercitata su di noi dall'oggetto su cui sediamo o siamo in piedi. Questa è numericamente uguale al nostro peso solo se nessuno ci sta seduto sopra, o ci solleva e solo se non siamo accelerati verso l'alto o il basso.

Ora passiamo ad esplorare cosa accade al valore letto sulla scala della bilancia mentre noi acceleriamo verso l'alto o verso il basso (per esempio in un ascensore).

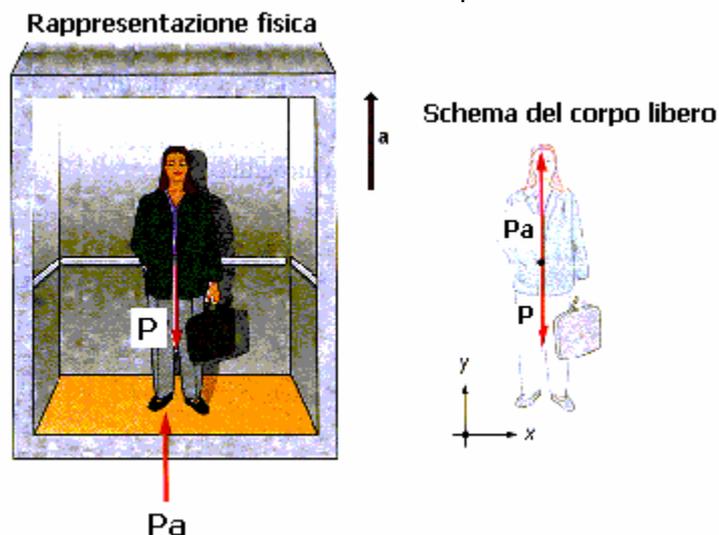
Cosa avvertiamo quando saliamo e scendiamo in ascensore? Una forza verso l'alto più intensa di quella che sentiamo di solito, se l'accelerazione è verso l'alto; una forza verso l'alto minore di quella avvertita normalmente, se l'accelerazione è verso il basso.

(Per finire si può discutere del caso limite: che cosa accade alla forza peso quando l'accelerazione verso il basso è sempre più vicina a quella della caduta libera? E se quest'ultima è addirittura più grande in modulo?)

Quando siamo in caduta libera la forza gravitazionale esercitata dalla Terra non si annulla. Quella che si è ridotta a zero è la forza che agisce sui nostri piedi: quella che avvertiamo direttamente. In questo caso proviamo una sensazione che potrebbe essere chiamata "**assenza di peso**". Da qui la terminologia imprecisa che può portarci a fraintendimenti.

Vediamo meglio nel dettaglio cosa accade. Proviamo a calcolare la forza che avvertiamo direttamente, che chiameremo **peso apparente** e indicheremo con P_a . Immaginiamo di essere in un ascensore che si muove verso l'alto con accelerazione a . Su di noi agiscono due forze:

1. il nostro peso P
2. la forza normale verso l'alto esercitata sui nostri piedi dall'ascensore P_a



(si noti e si ragioni sulla scelta del sistema di riferimento)

Proviamo a calcolare P_a applicando la seconda legge di Newton. La risultante delle forze è

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{P}_a - \mathbf{P}$$

Quindi:

$$\mathbf{P}_a - \mathbf{P} = m\mathbf{a}$$

$$P_a = P + ma = mg + ma = m(g+a)$$

Osserviamo che $P_a > P$, mentre nel caso in cui l'accelerazione fosse stata verso il basso sarebbe stato $P_a < P$, in accordo con quanto discusso precedentemente. Si può proporre quest'ultimo caso, come quesito, integrato con la domanda posta in precedenza : che cosa accade alla forza peso quando l'accelerazione verso il basso è sempre più vicina a quella della caduta libera? E se quest'ultima è addirittura più grande in modulo ?

Osservazione:

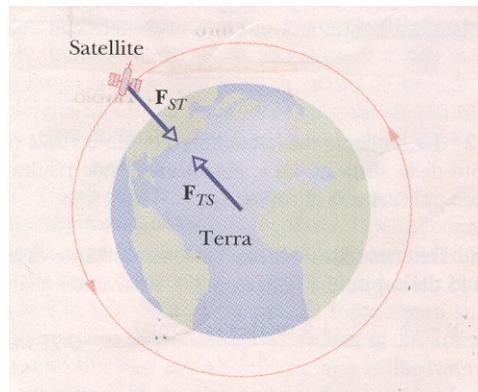
La terza legge di Newton implica sempre più di un oggetto.

- Quando si spara un colpo di pistola, la forza del gas prodotto dalla combustione della polvere da sparo spinge in fuori il proiettile. Per la legge di Newton, la pistola rincula all'indietro.
- L'impugnatura di un grosso idrante ha delle maniglie che i pompieri devono afferrare saldamente, poiché il getto dell'acqua che fuoriesce spinge energicamente il tubo all'indietro.
- I getti rotanti per l'annaffiamento dei giardini funzionano sullo stesso principio. In modo simile, il moto in avanti di un razzo è dovuto alla reazione al violento getto di gas caldo che fuoriesce dalla sua parte posteriore.

Chi ha familiarità con le piccole imbarcazioni sa bene che prima di saltare da una barca verso il molo di attracco, è opportuno legare prima la barca al molo e afferrare una presa sul molo prima di saltare. Altrimenti, quando si salta, la barca si allontana dal molo, facendo fallire il salto, oppure spingendo la barca fuori dalla nostra portata. Tutto questo è dovuto alla terza legge di Newton: quando le gambe spingono il corpo verso il molo, esse esercitano anche sulla barca una forza uguale e in verso opposto, e questa forza spinge via la barca dal molo.

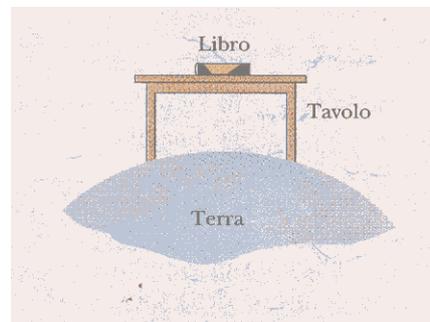
Esempi:

1. Satellite orbitante



In figura è rappresentato un satellite in orbita attorno alla Terra. La sola forza agente sul satellite è l'attrazione gravitazionale della Terra, F_{ST} . Dove è applicata la reazione a questa forza? Si tratta della forza gravitazionale F_{TS} applicata dal satellite sulla Terra. Riferendoci solo ai moduli delle due forze, $F_{ST} = F_{TS}$, mentre le due forze in verso sono opposte. Probabilmente sembrerà strano che il piccolo satellite possa esercitare una forza sulla Terra: in realtà la forza che il satellite esercita produce una accelerazione della Terra che però, a causa della grande massa di quest'ultima, non può essere facilmente misurata e può ritenersi trascurabile.

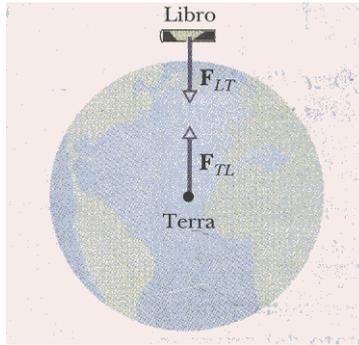
2. Libro appoggiato sul tavolo



La figura mostra un libro appoggiato sul piano di un tavolo. La Terra spinge il libro verso il basso con una forza F_{LT} . Il libro non accelera verso il basso perché questa forza è bilanciata dalla forza di contatto F_{LP} uguale e opposta esercitata dal piano del tavolo (bisognerà spiegare brevemente questo concetto di forza di contatto, che verrà ripreso più avanti nel programma).

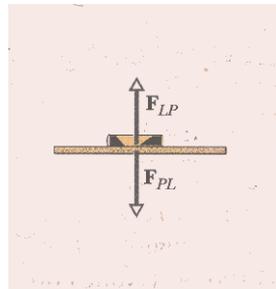
Osserviamo che anche se le due forze F_{LT} e F_{LP} sono uguali e contrarie esse non formano una coppia di azione e reazione: infatti esse agiscono sullo stesso corpo che è il libro!

Le due forze semplicemente si bilanciano per il fatto che il libro non è accelerato. Quindi, ognuna di queste due forze ha una corrispondente reazione: dove sono applicate queste reazioni? La reazione F_{LT} a F_{TL} rappresenta la forza gravitazionale con la quale il libro attira la Terra, come mostrato nella figura seguente



prima coppia (libro e Terra) $F_{LT} = -F_{TL}$

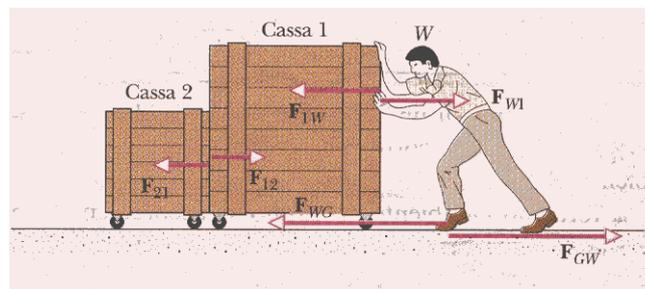
Invece la reazione F_{PL} a F_{LP} è la forza con la quale il libro agisce sul piano del tavolo, come mostrato nella figura seguente



seconda coppia (libro e tavolo) $F_{PL} = -F_{LP}$

3. Spinta di una fila di casse

La figura sottostante mostra un lavoratore W che spinge due casse, ognuna delle quali è posta su un carrello che si muove senza attrito. Il lavoratore esercita una forza F_{1W} sulla cassa 1, la quale esercita a sua volta una reazione F_{W1} sul lavoratore. La cassa 1 spinge la cassa 2 con la forza F_{21} , mentre questa reagisce applicando sulla cassa 1 una forza F_{12} (osserviamo che il lavoratore non esercita direttamente alcuna forza sulla cassa 2). Per muoversi in avanti, il lavoratore deve spingere sul suolo. Così, mentre egli esercita una forza F_{GW} sul suolo, la reazione F_{WG} a tale forza è applicata dal suolo sul lavoratore che viene quindi spinto in avanti. La figura seguente mostra dunque le 3 coppie di azione e reazione.



coppie di azione e reazione:
cassa 1 e cassa 2; lavoratore e cassa 1; lavoratore e suolo

Dalla seconda legge di Newton, l' accelerazione della cassa 2 è determinata dalla risultante delle forze su essa applicate: $F_{12} = m_2 a_2$. Analogamente, la risultante delle forze applicate sulla cassa 1 determina la sua accelerazione: $F_{1W} - F_{12} = m_1 a_1$. Se le due casse rimangono in contatto, le loro accelerazioni devono essere uguali. Se a è l' accelerazione comune delle due casse, sommando le precedenti due equazioni otteniamo: $F_{1W} - F_{12} + F_{21} = F_{1W} = (m_1 + m_2)a$. Potevamo giungere alla stessa conclusione, considerando le due casse come un unico corpo di massa $m_1 + m_2$: la forza efficace agente sulle due casse è allora F_{1W} . Osserviamo inoltre che se non ci fosse attrito tra il piede del lavoratore e il suolo, egli non potrebbe spostare le casse.

Si confida in discussioni svolte in classe, che possono partire dall' esame di tutte (ed altre) le situazioni presentate.

Proposta di verifica sommativa (1h)

Esercizio 1 (2 punti)

Un sistema di riferimento inerziale è:

- Un sistema particolarmente leggero
- Un sistema in rapida rotazione rispetto alla terra
- Un sistema in cui la massa degli oggetti è sempre nulla
- Nessuna delle precedenti

Esercizio 2 (4 punti)

Se sei in un ascensore che si muove verso l'alto con velocità costante, il tuo peso apparente è

- Uguale a mg
- Maggiore di mg
- Minore di mg

Esercizio 3 (4 punti)

La forza che si esercita sul fucile che rincula è tanto intensa quanto la forza che spinge il proiettile lungo la canna. Perché allora l'accelerazione del proiettile è maggiore di quella del fucile?

Esercizio 4 (4 punti)

Siete seduti su una sedia che appoggia sul terreno. Disegnare diagrammi di forze per il vostro corpo, la sedia e l'intera terra. Descrivete a parole ogni forza, dire quale oggetto esercita quella forza e su quale altro oggetto la esercita. Mostrare le intensità delle forze disegnando una freccia più lunga se la forza è più intensa e frecce di uguale lunghezza per forze di uguale intensità. Identificare le coppie di forze legate tra loro dalla terza legge.

Esercizio 5 (8 punti)

Un salmone di 5,0 Kg viene pesato appendendolo a una bilancia a molla attaccata al soffitto di un ascensore. Indica qual'è il peso apparente del salmone se l'ascensore:

1. è fermo
2. si muove con accelerazione verso l'alto di $2,5 \text{ m/s}^2$;
3. si muove con accelerazione verso basso di $3,2 \text{ m/s}^2$;

Esercizio 6 (8 punti)

Due gruppi di canoisti si incontrano nel mezzo di un lago. Dopo una breve chiacchierata, una persona della canoa 1, per separare le canoe, spinge la canoa 2 con una forza di 46N. Se la massa della canoa 1, con i suoi occupanti, è di $m_1 = 150Kg$ e la massa della canoa 2, con i suoi occupanti, è $m_2 = 250N$:

- Trova l'accelerazione fornita dalla forza a ognuna delle due canoe;
- Qual è la distanza tra le due canoe dopo 1,2 s dalla spinta?

Esercizio 7 (8 punti)

Una scatola di massa $m_1 = 10Kg$ è ferma sul pavimento liscio e orizzontale vicino a una scatola di massa $m_2 = 5Kg$. Se spingi sulla scatola 1 con forza orizzontale di intensità $F = 20N$:

- Qual'è l'accelerazione delle scatole?
- Qual'è la forza di contatto tra le due scatole?
- Se applichiamo a forza sulla massa 2 invece che sulla 1, la forza di contatto cambia?

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.