



Taiga/Shutterstock

1 IL PRIMO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

Le tre leggi fondamentali della meccanica sono i *principi della dinamica*, enunciati da Isaac Newton nel suo trattato del 1687 *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

Il **primo principio della dinamica**, detto anche **principio d'inerzia**, fu in realtà esposto per la prima volta da Galileo Galilei e stabilisce che

un punto materiale mantiene costante la propria velocità **se e solo se è soggetto a una forza totale nulla**. In particolare, quando la velocità è nulla il corpo è inizialmente fermo e continua a rimanere fermo.

Quindi un oggetto in movimento che non fosse soggetto ad alcuna forza (neppure a quelle di attrito) continuerebbe a muoversi per sempre con la stessa velocità vettoriale, cioè nella stessa direzione, nello stesso verso e con lo stesso valore della velocità.

I sistemi di riferimento inerziali

Esistono però delle forze apparenti, come quelle che avvertiamo quando un mezzo di trasporto accelera o frena bruscamente. Ciò ci fa capire che:

il primo principio della dinamica non vale in tutti i sistemi di riferimento; chiamiamo **sistemi di riferimento inerziali** quelli in cui esso vale.

L'esperienza dice che, dato un sistema di riferimento *inerziale* S :

- tutti i sistemi che si muovono con velocità costante rispetto a S sono anch'essi inerziali;
- tutti i sistemi di riferimento che rispetto a S sono accelerati *non* sono inerziali.

Il sistema di riferimento IRC

Come definire, in concreto, un sistema di riferimento inerziale? L'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha scelto il *Sistema Internazionale di Riferimento Celeste* (ICRS - *International Celestial Reference System*), che ha come origine degli assi la posizione che il baricentro del Sistema Solare aveva il giorno 1 gennaio 2000 quando a Greenwich erano le 12 precise. Nel seguito lo chiameremo spesso «Sistema IRC». Le direzioni dei tre assi sono «fisse» nello spazio cosmico nel senso che puntano verso tre punti lontanissimi che si trovano fuori della nostra Galassia. In pratica le loro direzioni sono definite dall'osservazione di 608 sorgenti extragalattiche che emettono onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda pari a 13 cm e 3,6 cm.

La maggior parte di queste sorgenti sono *quasar*. Esse sono osservate con più **parabole**, che registrano contemporaneamente le onde elettromagnetiche emesse da queste sorgenti e ne determinano la direzione di provenienza con grandissima precisione facendo uso della tecnica detta «*Very Large Base Interferometry*» (VLBI).



Vadim Ponomarev/Shutterstock

Osservatorio di Greenwich

Il Reale Osservatorio di Greenwich si trova nei pressi di Londra. Nel 1884 la Conferenza Internazionale dei Meridiani (che si svolgeva a Washington) scelse il meridiano passante per l'osservatorio come meridiano «zero» o di riferimento.



Lance Bellers/Shutterstock

Il sistema di riferimento della Terra

Soltanto i sistemi di riferimento che si muovono a velocità costante rispetto al sistema IRC sono inerziali in senso stretto; quelli, che nello stesso sistema IRC sono accelerati, non sono inerziali.

Quindi la Terra, a rigore, non costituisce un sistema inerziale in quanto, rispetto a IRC, ha un moto di rotazione attorno al proprio asse, un moto accelerato attorno al Sole e, infine, un moto accelerato, insieme con il Sole, attorno al centro della Galassia. La tabella seguente fornisce il valore delle accelerazioni in gioco in questi moti.

| Moto | Accelerazione (m/s ²) |
|---|-----------------------------------|
| Sole intorno al centro della Via Lattea | $2,5 \times 10^{-10}$ |
| Terra intorno al centro del Sole | $6,0 \times 10^{-3}$ |
| Crosta terrestre intorno all'asse della Terra | $3,0 \times 10^{-2}$ |

Queste accelerazioni sono molto piccole (la maggiore di esse è centinaia di volte minore dell'accelerazione di gravità g) e i loro effetti sono di solito trascurabili (e quindi invisibili) in un laboratorio come quello in cui abbiamo controllato la validità del principio d'inerzia.

IN LABORATORIO

Caduta nel tubo a vuoto

- Video (2 minuti)
- Test (3 domande)



Essi però diventano rilevanti per fenomeni che durano molto a lungo e che spaziano su ampie zone della superficie terrestre: per esempio, i **cicloni** hanno una rotazione in senso antiorario nell'emisfero Nord della Terra e in senso orario nell'emisfero Sud. Questo effetto dipende direttamente dal fatto che, per questi fenomeni, il sistema di riferimento della Terra *non* è inerziale.



Krischner/Shutterstock

2 IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ GALILEIANA

Nella *Seconda Giornata* del *Dialogo sopra i Due Massimi Sistemi*, Galileo Galilei descrive un esperimento da compiere all'interno di una nave.

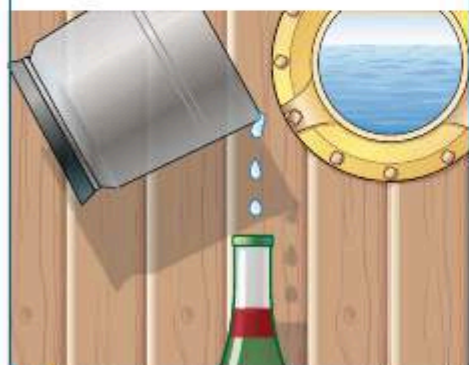
Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti.

Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma.

Voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, nè, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso la poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella loro acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate [...].

Cioè, quando la nave è ferma

l'acqua che scende goccia a goccia da un secchiello entra nel collo di una bottiglia;



A

saltando verso prua o verso poppa a piedi pari con la stessa forza, si supera la stessa distanza.



B

Quando la nave è in moto, a velocità costante e senza scosse, gli stessi fenomeni avvengono nella stessa maniera: saltare verso prua non è più faticoso che saltare verso poppa e le gocce d'acqua non «rimangono indietro» in modo da non centrare più l'apertura della bottiglia.

Questa scoperta di Galileo viene espressa, con un linguaggio moderno, come **principio di relatività galileiana**:

le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali, qualunque sia la velocità (costante) con cui essi si muovono gli uni rispetto agli altri.

Come conseguenza di questo principio, nessun esperimento di meccanica compiuto al chiuso (cioè senza guardare fuori dal finestrino) ci può permettere di capire se siamo fermi in un sistema di riferimento inerziale, per esempio la Terra oppure se, rispetto a esso, ci stiamo muovendo a velocità costante (figura 1).



Figura 1 L'astronave è ferma o si muove a velocità costante?

Le trasformazioni di Galileo

Anche se in due sistemi di riferimento inerziali valgono le stesse leggi della meccanica, la descrizione del moto può essere diversa. Per esempio nel sistema di riferimento del treno (che si muove a velocità costante), un libro risulta fermo; però, rispetto ai binari, il libro si muove di moto rettilineo uniforme.

Vogliamo trovare delle leggi che permettano di descrivere *quantitativamente* il moto in un certo sistema di riferimento inerziale S' , se conosciamo le caratteristiche dello stesso moto in un altro sistema inerziale S (che potrebbe essere il sistema IRC).

Indichiamo con

- t l'istante di tempo misurato nel sistema di riferimento S ;
- t' l'istante di tempo misurato nel sistema di riferimento S' .

Galileo ed Einstein

Secoli dopo Albert Einstein, nella teoria della relatività ristretta, farà l'ipotesi che tutte le leggi della fisica, non soltanto quelle della meccanica, siano le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

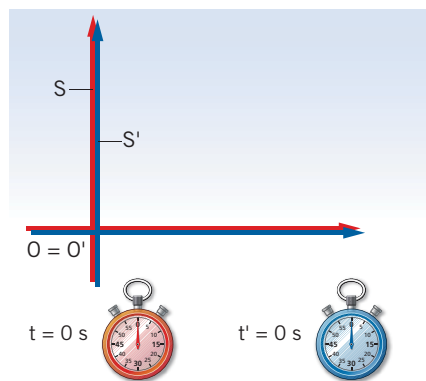


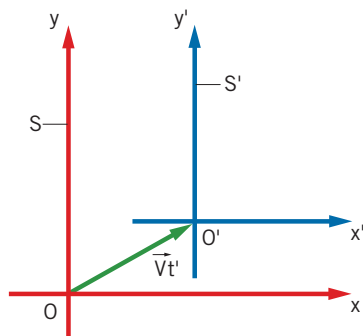
Figura 2 Sistemi di riferimento all'istante $t = 0$ s.

Per semplificare la trattazione, introduciamo due convenzioni (**figura 2**):

1. i cronometri nei due sistemi di riferimento partono insieme; così gli istanti $t = 0$ s e $t' = 0$ s coincidono e tutti i valori successivi segnati dai due orologi sono identici: $t = t'$;
2. all'istante $t = t' = 0$ s i due sistemi di riferimento S e S' coincidono e, in particolare, le loro origini O e O' occupano lo stesso punto.

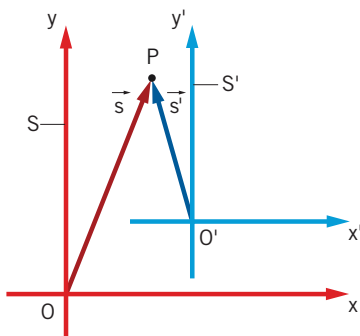
Descriviamo con il vettore \vec{V} la velocità (costante) con cui il sistema di riferimento S' si muove rispetto a S .

► All'istante t , la distanza tra l'origine O e l'altra origine O' è data dal vettore $\vec{V}t = \vec{V}t'$.



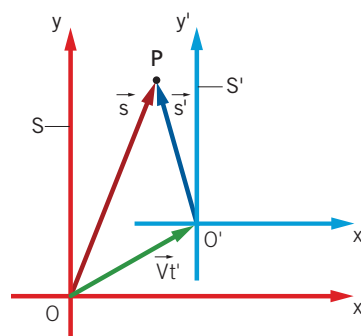
A

► I vettori \vec{s} e \vec{s}' indicano la posizione del punto P nei sistemi di riferimento S e S' .



B

► Si vede dal disegno che vale la relazione $\vec{s} = \vec{s}' + \vec{V}t'$.



C

Così, conoscendo le grandezze misurate in S' è possibile calcolare le corrispondenti grandezze di S attraverso le relazioni:

$$\begin{cases} \vec{s} = \vec{s}' + \vec{V}t' \\ t = t' \end{cases} \quad (1)$$

Da queste si ricavano le leggi che permettono di passare dalle quantità di S a quelle di S' :

$$\begin{cases} \vec{s}' = \vec{s} - \vec{V}t \\ t' = t \end{cases} \quad (2)$$

Le formule (1) e (2) sono dette **trasformazioni di Galileo**. In entrambe, la prima equazione afferma che gli spostamenti di un oggetto nei due sistemi inerziali sono legati da una relazione lineare nel tempo; la seconda equazione dice che il tempo scorre in modo uguale nei due sistemi.

Indichiamo ora con \vec{v} la velocità di un punto materiale misurata nel riferimento S e con \vec{v}' la velocità dello stesso oggetto rispetto a S' .

Che relazione c'è tra \vec{v} e \vec{v}' ? Applicando la (1) a un piccolo intervallo di tempo $\Delta t = \Delta t'$ si ha

$$\Delta \vec{s} = \Delta \vec{s}' + \vec{V} \Delta t'.$$

Dividendo il primo membro per Δt e il secondo membro per $\Delta t'$ si ricava:

$$\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{s}'}{\Delta t'} + \vec{V}$$

cioè:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} \quad \text{e} \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}. \quad (3)$$

Possiamo quindi affermare che:

la velocità di un oggetto rispetto a S è data dalla velocità dello stesso oggetto rispetto a S' , sommata con la velocità di S' rispetto a S .

ESEMPIO

Su una strada rettilinea un'automobile A vede una seconda automobile B che la sorpassa alla velocità costante di 30 km/h. Una pattuglia stradale ferma sulla strada misura la velocità dell'automobile A , che risulta di 60 km/h.

► Qual è la velocità dell'automobile B , misurata dalla pattuglia?

Il problema si risolve con la prima delle formule (3), anche se non c'è bisogno di utilizzare i vettori in quanto le velocità delle due auto hanno la stessa direzione e lo stesso verso.

Indichiamo con

- $v' = 30$ km/h la velocità dell'automobile B nel sistema di riferimento S' in cui A è ferma;
- $V = 60$ km/h la velocità di S' rispetto a S (sistema di riferimento in cui la pattuglia è ferma).

Allora la velocità v dell'automobile B in S è:

$$v = v' + V = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}} + 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

L'ambito di validità delle trasformazioni di Galileo

Le formule (1), (2) e (3) risolvono in modo corretto il problema di passare da un sistema di riferimento inerziale a un altro fino a quando le velocità coinvolte non sono troppo elevate.

Però, quando le velocità in gioco arrivano a essere confrontabili con la velocità c della luce nel vuoto, il modello costituito dalla *relatività galileiana* e dalle *trasformazioni di Galileo* non è più in accordo con gli esperimenti e deve essere sostituito da un nuovo modello, dato dalla **relatività ristretta** di Einstein e dalle **trasformazioni di Lorentz**. Quindi

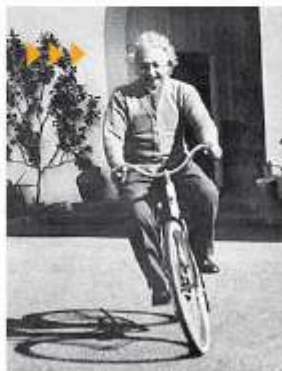
Fisica moderna

La teoria della relatività ristretta e le trasformazioni di Lorentz sono trattate nella sezione del testo dedicata alla Fisica moderna.

la relatività galileiana e le trasformazioni di Galileo costituiscono un modello fisico che ha un ambito di validità limitato a velocità abbastanza piccole rispetto a quella della luce nel vuoto.

A sua volta, il modello espresso dalle trasformazioni di Lorentz può essere visto come una *generalizzazione* del modello galileiano perché le trasformazioni di Lorentz si riconducono a quelle di Galileo nel limite in cui tutte le velocità sono piccole rispetto a c .

In pratica, quindi, bastano Galileo e Newton per **andare in bicicletta** e anche per **andare sulla Luna**, ma serve **Einstein** per descrivere il comportamento delle particelle che si muovono a velocità prossime a quella della luce nei grandi acceleratori, per esempio al CERN di Ginevra.



3 LA MASSA INERZIALE E LE DEFINIZIONI OPERATIVE

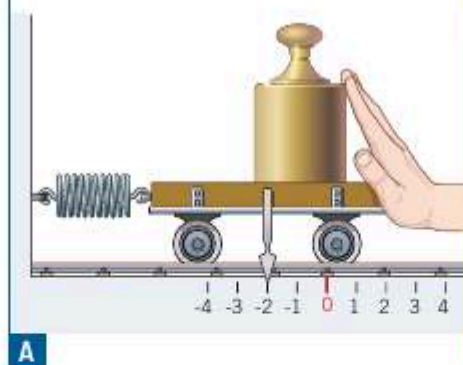
È esperienza comune che ogni oggetto mostra una certa resistenza (o inerzia) quando lo si vuole mettere in movimento.

Considerando due oggetti fatti della stessa sostanza, la resistenza è tanto maggiore quanto maggiore è il volume del corpo: una bottiglia grande richiede al lancio più sforzo che una bottiglia piccola. L'inerzia appare quindi determinata dalla «quantità di materia» di cui un oggetto è fatto.

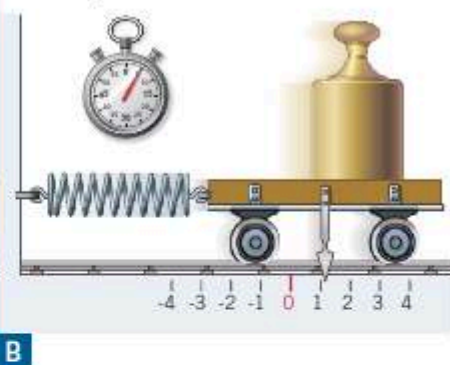
La grandezza che determina l'inerzia di un corpo si chiama **massa inerziale** (o, semplicemente, massa). Per definirla introduciamo un nuovo strumento, il **carrello delle masse**. Esso è costituito da un carrello, provvisto di un indice, che è collegato a una molla; a sua volta, la molla è fissata alla parete del laboratorio.

Per valutare la massa inerziale di un oggetto, lo mettiamo sul carrello delle masse.

Muoviamo il carrello in modo che questo, collegato alla molla, cominci a oscillare avanti e indietro.



Poi misuriamo il *periodo* di oscillazione T , cioè la durata di un'oscillazione completa.



Per esempio, si ha un'oscillazione completa quando il carrello, partito dall'estremo sinistro del suo moto, arriva prima all'estremità destra e poi torna a quella sinistra.

Oggetti con massa maggiore sono più difficili da spostare ed eseguono oscillazioni più lente; oggetti più leggeri oscillano più rapidamente. Quindi il periodo T di oscillazione del carrello, misurato con un orologio, è una proprietà che caratterizza

la massa del corpo che vi è appoggiato sopra (e anche quella del carrello; però questa non cambia nei vari esperimenti).

Due oggetti hanno masse uguali se, appoggiati separatamente sul carrello, compiono oscillazioni che hanno lo stesso periodo.

Per esempio, per tenere sotto controllo la forma fisica e la salute degli astronauti sulle navicelle spaziali in orbita attorno alla Terra, si utilizza una specie di sedia montata su un carrello delle masse: l'astronauta si «pesa» entrando nella sedia e registrando il periodo con cui essa oscilla avanti e indietro.

Questo dispositivo si chiama BMMD (*Body Mass Measurement Device*, cioè *Dispositivo per la misura della massa corporea*), ed è mostrato nella **fotografia**, che è stata scattata durante una simulazione a terra.



ANIMAZIONE

Massa e peso (1 minuto)



| La massa e il peso | | |
|---------------------------|--|--|
| | Massa (inerziale) | Peso |
| Definizione | È la grandezza che si misura con il carrello delle masse. | È la forza di gravità che si esercita su ogni massa vicino a un corpo celeste. |
| Metodo di misura | Carrello delle masse. Misura di F e di a . | Dinamometro |
| Proprietà misurata | Resistenza all'accelerazione | Pesantezza |
| Unità di misura | kilogrammo | newton |
| Tipo di grandezza | Scalare | Vettore |
| Caratteristiche | Rimane la stessa in tutti i luoghi. | Cambia da luogo a luogo, a seconda del valore dell'accelerazione di gravità. |
| Relazione | Il peso F_p è, in ogni luogo, proporzionale alla massa inerziale m e al valore locale dell'accelerazione di gravità g : $F_p = mg$. | |

Le definizioni operative

Per *definire* la grandezza fisica «massa inerziale» abbiamo descritto il modo con cui essa viene misurata. Questo è un esempio di *definizione operativa*, che è il procedimento corretto con cui si introducono le grandezze fisiche.

Una **definizione operativa** è composta:

- dalla descrizione degli strumenti di misura che si utilizzano per misurare la grandezza in esame;
- dalla specifica di un «protocollo di misura», cioè la procedura corretta con cui utilizzare gli strumenti.

Unità di misura

L'unità di misura è una componente essenziale degli strumenti di misura.

Per esempio, la definizione della grandezza fisica *massa* richiede:

1. **strumento di misura:** il carrello delle masse;
2. **protocollo:** per esempio, un oggetto ha una massa di 3 kg se, posto sul carrello, oscilla con lo stesso periodo con cui oscillano tre masse, tutte uguali all'unità di misura, messe sullo stesso carrello.

Le altre definizioni operative fondamentali della meccanica sono quelle della durata e della distanza; per la **durata** (o **intervallo di tempo**):

1. **strumento di misura:** un cronometro (figura 3);
2. **protocollo:** l'avvio del cronometro è simultaneo all'inizio dell'intervallo di tempo da misurare; l'arresto del cronometro è simultaneo alla fine dell'intervallo di tempo.



Figura 3 Definizione operativa dell'intervallo di tempo.

Per la **lunghezza**:

1. **strumento di misura:** un metro (figura 4), quando si misurano lunghezze di decimetri;
2. **protocollo:** si fa coincidere la prima tacca del metro con l'inizio della lunghezza da misurare; si legge sulla scala graduata il valore che corrisponde alla seconda estremità di tale lunghezza.

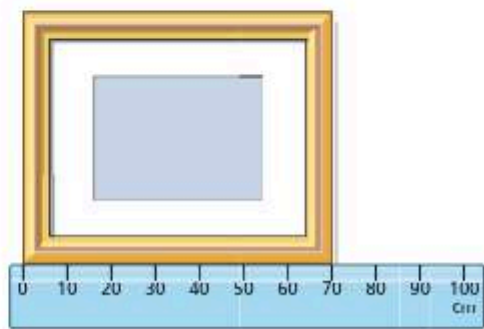


Figura 4 Definizione operativa della lunghezza.

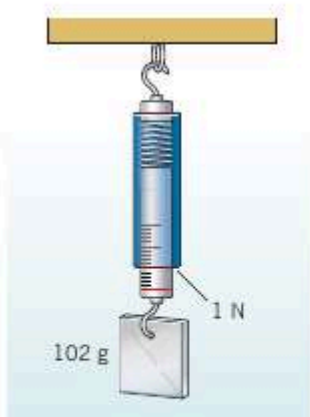


Figura 5 Processo di taratura del dinamometro.

Un po' più complesso è il discorso per la **forza**, che è una grandezza vettoriale.

- La **direzione e il verso della forza** sono quelli in cui inizia a muoversi un corpo inizialmente fermo (per esempio una pallina da golf) soggetto a quella forza.



- Per il modulo della forza:

1. **strumento di misura:** un dinamometro, tarato appendendo alla molla diversi oggetti identici al corpo campione, il cui peso fornisce l'unità di misura.
2. **protocollo:** si dispone il dinamometro (figura 5) nella direzione e nel verso della forza; si regola la scala in modo da portare l'indice sullo zero; si legge sulla scala il valore indicato.

4 IL SECONDO E IL TERZO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

Il **secondo principio della dinamica** o **legge fondamentale della dinamica** stabilisce che

la forza è uguale alla massa per l'accelerazione

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (4)$$

forza (N) massa (kg) accelerazione (m/s²)

Visto che la formula (4) è una relazione tra vettori, forza e accelerazione hanno la stessa direzione e lo stesso verso; inoltre, il modulo della forza è uguale al prodotto della massa per il modulo dell'accelerazione.

La formula (4) è alla base della definizione dell'unità di misura della forza, il *newton* (simbolo N):

un newton è il valore di una forza che, applicata a una massa di 1 kg, le imprime un'accelerazione pari a 1 m/s².

Questa proprietà si esprime attraverso la formula

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \quad (5)$$

ESEMPIO

Una pallina di massa $m = 0,12 \text{ kg}$ si muove con accelerazione $a = 2,5 \text{ m/s}^2$.

► Qual è il modulo F della forza totale che agisce su di essa?

Dalla formula (4) otteniamo:

$$F = ma = (0,12 \text{ kg}) \times \left(2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 0,30 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,30 \text{ N}.$$

Il terzo principio della dinamica

Il primo e il secondo principio della dinamica descrivono le proprietà meccaniche di un singolo oggetto.

Ciò che accade quando due corpi interagiscono tra loro è spiegato dal **terzo principio della dinamica** o **principio di azione e reazione**:

se un corpo A agisce con una forza su un corpo B , anche B esercita una forza sul corpo A : le due forze hanno lo stesso modulo, stessa direzione e versi opposti.

ESPERIMENTO VIRTUALE

Masse e accelerazioni

- Gioca
- Misura
- Esercitati



La formula che esprime il terzo principio è:

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A} \quad (6)$$

forza di A su B forza di B su A

Una verifica sperimentale delle leggi della dinamica: la sonda Voyager 2

UTC

Il *tempo coordinato universale* UTC è uno standard di tempo mantenuto da orologi atomici ed è riferito all'orario solare sul meridiano di Greenwich.

La **sonda Voyager 2** fu lanciata da Cape Canaveral alle 14:29:00 (tempo universale UTC) di sabato 20 agosto 1977.

Circa due anni dopo, il 9 luglio 1979 alle 22:29:51 UTC, la sonda raggiunse la minima distanza da Giove. Il tutto era stato progettato affinché l'intensa gravità di Giove deviasse la traiettoria della sonda verso Saturno; inoltre, nel passaggio vicino a Giove la sonda ricevette una «spinta» gravitazionale (effetto fionda) che ne aumentò la velocità in modo che potesse arrivare più rapidamente a Saturno.

Così Voyager 2 giunse alla minima distanza da Saturno il 26 agosto 1981 alle 03:24:57 UTC, di lì venne accelerata verso Urano, dove giunse (alla minima distanza) il 24 gennaio 1986 alle 17.59.47 UTC e, infine, da Urano venne indirizzato di nuovo **verso Nettuno**, che la sonda sorvolò alla minima distanza il 25 agosto 1989 alle 03.56.36 UTC.



NASA/Science Photo Library



Seth Shostak/Science Photo Library

La **figura 6** mostra la complessa traiettoria seguita dalla sonda nel sistema di riferimento IRC. Sono indicati gli orientamenti dei tre assi del sistema di riferimento IRC. L'origine degli assi si trovava, come detto nel paragrafo 1, nella posizione in cui si trovava il baricentro del Sistema Solare alle ore 12:00:00 UTC del primo gennaio 2000.

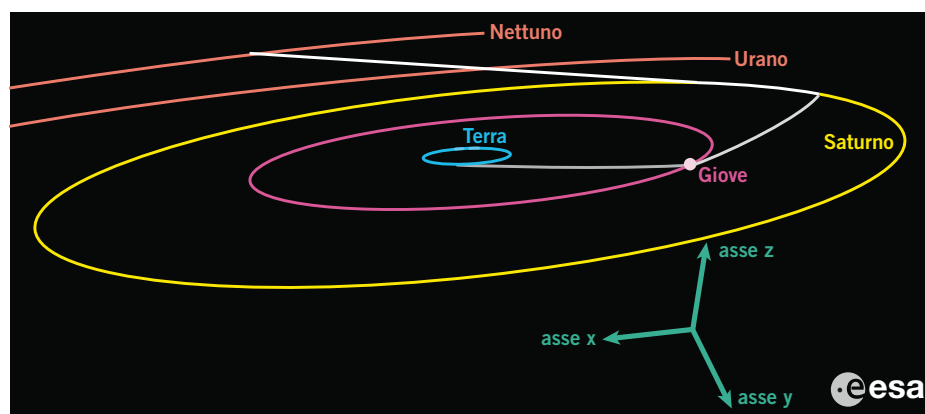


Figura 6 Per disegnare questa figura la traiettoria della sonda Voyager II è stata calcolata al centro ESTEC dell'European Space Agency (ESA).

Dopo avere raccolto e trasmesso a Terra una quantità enorme di informazioni e dopo avere reso possibile una serie di scoperte, ora la sonda Voyager 2 si sta allontanando dal Sole alla velocità di 15,478 km/s.

L'enorme successo della sonda Voyager 2 è dovuto al grande accordo tra le previsioni degli scienziati e la traiettoria seguita dalla sonda. I principi della dinamica sono stati utilizzati per prevedere le orbite dei pianeti e dei loro satelliti e per controllare il comportamento della sonda.

Le spinte del razzo di partenza e quelle dei piccoli razzi di navigazione (la sonda ne ha sedici) sono stati calibrati in modo che le accelerazioni subite dalla sonda fossero esattamente quelle che servivano per mantenerla sulla traiettoria calcolata.

Lo stesso è vero per tutte le sonde analoghe (per esempio la sonda gemella Voyager 1 lanciata il 5 settembre 1977, la **sonda Cassini** lanciata il 15 ottobre 1997, la sonda New Horizons lanciata il 19 gennaio 2006).



Christian Darwin/Science Photo Library

In tutti i casi il successo di queste missioni è una conferma della validità dei principi della dinamica esposti in questo capitolo e riassunti nella tabella seguente.

| Principio | Nome | Formula | In parole |
|-----------|-----------------------------------|--|--|
| Primo | Principio di inerzia | $\vec{v} = \text{costante}$ se $\vec{F} = 0$ | In un sistema di riferimento inerziale, un punto materiale isolato, cioè soggetto a una forza totale nulla, si muove di moto rettilineo uniforme. |
| Secondo | Legge fondamentale della Dinamica | $\vec{F} = m\vec{a}$ | In un sistema di riferimento inerziale, a ogni istante la forza risultante applicata a un punto materiale è uguale alla sua massa inerziale moltiplicata per l'accelerazione impressa dalla forza. |
| Terzo | Principio di azione e reazione | $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$ | In qualsiasi sistema di riferimento, se un corpo A esercita una forza su un corpo B, il corpo B esercita sul corpo A una forza uguale e contraria. |

Bisogna notare che, mentre il primo e il secondo principio della dinamica valgono *soltanto* nei sistemi di riferimento inerziali, il terzo principio è valido in *qualsunque* sistema di riferimento.

ISAAC NEWTON



A meno d'un anno dalla morte di Galileo Galilei, Isaac Newton nacque il giorno di Natale del 1642 a Woolsthorpe, nell'Inghilterra centrale. Il padre morì prima che nascesse, e Isaac fu affidato alla nonna materna quando la madre si risposò. Finita la scuola, che frequentò nella cittadina di Grantham, Isaac tornò a Woolsthorpe per rimanervi. Ma uno zio e il direttore della scuola convinsero la madre a mandarlo al Trinity College di Cambridge dove entrò, diciottenne, il 5 giugno 1661.

ALL'UNIVERSITÀ

Dei primi tempi di Cambridge l'evento più importante fu l'incontro col matematico Isaac Barrow (1630-1677), che in seguito avrebbe apprezzato il genio del giovane studente.

Nell'aprile del 1664 Newton ottenne una borsa di studio, che gli garantiva altri quattro anni di studio. Al principio dell'inverno 1664-5 cominciò quelle ricerche in matematica che lo avrebbero portato, nel giro di due anni, all'invenzione del calcolo infinitesimale, alla scoperta cioè dei metodi per il calcolo delle aree di figure qualsiasi (calcolo integrale), alla determinazione della retta tangente a una

curva (calcolo differenziale) e, soprattutto, a capire che i due problemi sono l'uno l'inverso dell'altro. Nel 1665 conseguì il titolo di *Bachelor of Arts*. Al principio dell'estate vi fu un'epidemia di peste, e l'Università fu chiusa, costringendo Newton a tornare a Woolsthorpe.

GLI ANNI MIRABILES

Newton medita nella quiete di Woolsthorpe. Riflette sul rapporto tra la forza centrifuga della Luna nel moto attorno alla Terra e la forza di gravità con cui la Terra attira la Luna. Intuisce che la forza con cui i pianeti tentano di allontanarsi dal Sole varia come l'inverso del quadrato della distanza dal Sole. È il primo passo verso la legge di gravitazione universale. Elabora la teoria secondo cui la luce bianca è un miscuglio di raggi di diverso colore, deviati (rifratti) in maniera diversa se li si fa incidere su un prisma di vetro: di più l'azzurro, di meno il rosso. Fa l'esperimento di proiettare i raggi su una parete e osserva così lo *spettro* della luce solare. Abilissimo con le mani, prepara da solo gli strumenti che gli occorrono. Diviene il primo a realizzare un telescopio a riflessione.

Negli *anni mirabiles* tra il 1664 e il 1666 Newton pose le basi delle sue grandiose realizzazioni. Restava molta strada per giungere alle opere complete, ma poteva esser fiero di sé. Nel 1660 era un ragazzo di provincia che sognava di andare all'università. Sei anni dopo possedeva il calcolo infinitesimale ed era autore di notevoli scoperte in ottica e meccanica. Era il più grande matematico d'Europa e uno dei fisici (allora si diceva «filosofi naturali») più eminenti.

Tornato a Cambridge nel 1667, Newton divenne *Master of Arts* l'anno seguente e nel 1669 succedette a Isaac Barrow sulla cattedra di matematica, che avrebbe occupato fino al 1701.

ALCHIMIA E PIANETI

Newton si dedicò lungamente a studi di alchimia e teologia: oggi non li considereremmo «scientifici». Gli studi di alchimia furono però importanti perché lo aiutarono a maturare una posizione filosofica secondo cui la materia non è incapace di esercitare attrazione o repulsione, come invece voleva la filosofia cartesiana. Secondo Newton le particelle di materia erano in grado di interagire tra loro con forze variabili con la distanza, una riflessione importante per la genesi della gravitazione universale.

Nell'inverno del 1679-80, stimolato da un carteggio con Robert Hooke (1635-1702), Newton considerò il moto orbitale dei pianeti dovuto a una forza centripeta che li fa deviare continuamente dalla traiettoria rettilinea. Prima di allora si guardava al problema solo dal punto di vista della forza centrifuga. Era il primo passo verso una concezione moderna della forza e della meccanica. Newton giunse anche a dimostrare che la forza necessaria a far percorrere a un corpo un'orbita ellittica deve variare come l'inverso del quadrato della distanza.

Quattro anni dopo raccontò con semplicità questa scoperta sbalordendo l'astronomo Edmund Halley (1656-1742), giunto apposta da Londra per interrogarlo sui suoi studi di meccanica.

I PRINCIPIA

Halley lo incoraggiò a proseguire: Newton era ormai arrivato alla fondazione della meccanica moderna, nella quale la forza non è più «qualcosa» che i corpi in moto posseggono (visione tipica della meccanica del Seicento) ma «qualcosa» che modifica dall'esterno il moto dei corpi. Nel 1687 vide la luce il capolavoro di Newton, i *Philosophiae*

Naturalis Principia Mathematica (*Principi Matematici di Filosofia Naturale*). Halley curò l'edizione e sostenne le spese di stampa. Apparvero le leggi del moto «newtoniane» (il principio di inerzia; la legge fondamentale della dinamica; il principio di azione e reazione), la legge di gravitazione universale e il «Sistema del Mondo» ovvero la descrizione dei moti dei corpi del sistema solare.

Né la meccanica, né la vita dell'autore sarebbero rimaste le stesse. Eletto deputato al Parlamento nel 1689, Newton divenne in seguito direttore e poi governatore della Zecca. Nel 1693 un grave esaurimento, dovuto all'intenso lavoro, fece temere per la sua salute: questo periodo segnò la fine dell'attività creativa di Newton.

L'OTTICA

Nel 1703 fu eletto presidente della Royal Society, carica in cui rimase fino alla morte. Nel 1704 fu pubblicata l'*Ottica*, l'altro pilastro sul quale riposa la sua fama. Se i *Principia* furono la base per la moderna fisica-matematica, l'*Ottica* fu il seme da cui nacque la moderna fisica sperimentale. Newton vi espose la teoria secondo cui la luce è formata da un'infinità di particelle emesse da un corpo in tutte le direzioni. Il fascino dell'*Ottica* è accresciuto dal fatto che, nel corso delle varie edizioni, Newton vi aggiunse delle «Questioni», ovvero dei problemi aperti di scienza, in cui lo troviamo più problematico e incline alle congetture.

NEWTON E IL SUO TEMPO

Newton è spesso ricordato per la celebre frase «non invento ipotesi» (*hypotheses non fingo*), apparsa nell'edizione del 1713 dei *Principia*. Ma ne faceva anch'egli, come tutti gli scienziati. Il detto ha però acquistato tale fama da far dimenticare che le ipotesi, come le prove sperimentali, sono entrambe necessarie alla scienza.

La vita di Newton fu punteggiata da numerose e veementi polemiche (in genere su questioni di priorità) che lo videro opposto, tra gli altri, a Hooke per questioni di ottica e di meccanica e a Leibniz (1646-1716) per l'invenzione del calcolo infinitesimale. Il carattere chiuso e dispotico non facilitò i rapporti col prossimo. Morì nelle prime ore del mattino di lunedì 20 marzo 1727. Fu sepolto con grandi onori nell'abbazia di Westminster. Il suo epitaffio invita i comuni mortali a rallegrarsi che sia esistito «un tale e così grande orgoglio del genere umano».

IL PRIMO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

La *relatività galileiana* e le *trasformazioni di Galileo* costituiscono un modello fisico con un ambito di validità limitato a velocità abbastanza piccole rispetto a quella della luce nel vuoto. Quando le velocità in gioco diventano confrontabili con la velocità della luce nel vuoto, il modello galileiano non è più in accordo con gli esperimenti e deve essere sostituito da un nuovo modello, dato dalla *relatività ristretta* di Einstein e dalle *trasformazioni di Lorentz*.

Primo principio della dinamica

Un punto materiale mantiene costante la propria velocità **se e solo se** è soggetto a una *forza totale nulla*. In particolare, quando la velocità è nulla il corpo è inizialmente fermo e continua a rimanere fermo.

- Viene anche chiamato **principio d'inerzia**.

Sistemi di riferimento inerziali

Sistemi di riferimento nei quali vale il primo principio della dinamica.

- Tutti i sistemi che si muovono con velocità costante rispetto a un sistema di riferimento inerziale sono anch'essi inerziali; tutti i sistemi accelerati rispetto a un sistema di riferimento inerziale *non* sono inerziali.

Sistema di riferimento IRC

Il Sistema *Internazionale di Riferimento Celeste* ha come origine degli assi la posizione che il baricentro del Sistema Solare aveva il 1 gennaio 2000 quando a Greenwich erano le 12, mentre le direzioni dei tre assi puntano verso tre punti lontanissimi al di fuori della nostra Galassia.

- Soltanto i sistemi di riferimento che si muovono a velocità costante rispetto al sistema IRC sono inerziali in senso stretto.

Sistema di riferimento della Terra

A rigore, non costituisce un sistema inerziale in quanto, rispetto a IRC, ha un moto di rotazione attorno al proprio asse, un moto accelerato attorno al Sole e, infine, un moto accelerato, insieme con il Sole, attorno al centro della Galassia.

- In laboratorio gli effetti delle accelerazioni della Terra sono di solito trascurabili e il sistema di riferimento terrestre può essere considerato inerziale.

Principio di relatività galileiana

Le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali, qualunque sia la velocità (costante) con cui essi si muovono gli uni rispetto agli altri.

- Implica che nessun esperimento di meccanica compiuto al chiuso ci può permettere di capire se siamo fermi in un sistema di riferimento inerziale, per esempio la Terra, oppure se, rispetto a esso, ci stiamo muovendo a velocità costante.

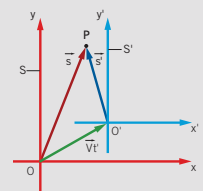


Trasformazioni di Galileo

Permettono di descrivere quantitativamente il moto in un certo sistema di riferimento inerziale S' se conosciamo le caratteristiche dello stesso moto in un altro sistema inerziale S :

$$\begin{cases} \vec{s} = \vec{s}' + \vec{V}t' \\ t = t' \end{cases} \quad \begin{cases} \vec{s}' = \vec{s} - \vec{V}t \\ t' = t \end{cases}$$

- \vec{s} e \vec{s}' indicano la posizione del punto P nei riferimenti S e S' ;
- t è l'istante di tempo misurato nel sistema di riferimento S ;
- t' è l'istante di tempo misurato nel sistema di riferimento S' ;
- \vec{V} è la velocità (costante) con cui il sistema di riferimento S' si muove rispetto a S .



In entrambe, la prima equazione afferma che gli spostamenti di un oggetto nei due sistemi inerziali sono legati da una relazione lineare nel tempo; la seconda equazione dice che il tempo scorre in modo uguale nei due sistemi.

Per le velocità

La velocità di un oggetto rispetto a S è data dalla velocità dello stesso oggetto rispetto a S' , sommata con la velocità di S' rispetto a S .

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} \quad \text{e} \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{V}$$

- \vec{v} è la velocità di un punto materiale misurata nel riferimento S ;
- \vec{v}' la velocità dello stesso oggetto rispetto a S' .

IL SECONDO E IL TERZO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

Le grandezze fisiche si definiscono attraverso un procedimento chiamato *definizione operativa*. Una definizione operativa è composta dalla descrizione degli strumenti di misura che si utilizzano per misurare la grandezza in esame e dalla specifica di un *protocollo di misura*, cioè la procedura corretta con cui utilizzare gli strumenti.

Massa (inerziale) e peso

Massa (inerziale)

È la grandezza che si misura con il *carrello delle masse*.

- Due oggetti hanno masse uguali se, appoggiati separatamente sul carrello delle masse, compiono oscillazioni con lo stesso periodo.
- La sua unità di misura nel SI è il *kilogrammo*.
- È una grandezza *scalare*.
- Rimane la stessa in tutti i luoghi.

Il peso F_p è, in ogni luogo, proporzionale alla massa inerziale m e al valore *locale* dell'accelerazione di gravità g : $F_p = mg$.

Peso

È la *forza di gravità* che si esercita su ogni massa vicino a un corpo celeste.

- Si misura con il *dinamometro*.
- La sua unità di misura è il *newton*.
- È un *vettore*.
- Cambia da luogo a luogo, a seconda del valore dell'accelerazione di gravità.

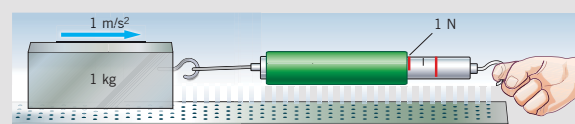
Secondo principio della dinamica

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

forza totale sul corpo =
= massa del corpo \times accelerazione del corpo

- Il vettore accelerazione \vec{a} e il vettore forza \vec{F} sono direttamente proporzionali: la forza totale che agisce sul corpo è la somma vettoriale delle diverse forze che agiscono contemporaneamente sul corpo.
- Il valore dell'accelerazione \vec{a} è inversamente proporzionale alla massa inerziale m del corpo su cui agisce la forza.
- È noto anche come *principio fondamentale della dinamica*.

Newton



$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

- È l'unità di misura della forza (simbolo N) nel Sistema Internazionale.
- Un newton è il valore di una forza che, applicata a una massa di 1 kg, le imprime un'accelerazione pari a 1 m/s^2 .

Terzo principio della dinamica

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

forza di A su B = - forza di B su A

- Se un corpo A agisce con una forza su un corpo B, anche B esercita una forza sul corpo A: le due forze hanno lo stesso modulo, la stessa direzione e versi opposti.
- È noto anche come *principio di azione e reazione*.

DOMANDE SUI CONCETTI

- 1** Perché una scatola che viene fatta scivolare sul pavimento di una stanza finisce per fermarsi? Questo fatto viola il principio di inerzia?
- 2** Osservi un autobus che si muove con velocità costante lungo una strada rettilinea. Puoi dire che la somma delle forze applicate su di esso è nulla?
- 3** Un sistema di riferimento S è accelerato uniformemente rispetto a un sistema di riferimento non inerziale S' . Puoi concludere che anche il sistema S allora è non inerziale?
- 4** Tommaso vuole scoprire se il suo zaino ha una massa di 2 kg. Ha a disposizione un carrello delle masse e alcuni pesi-campione identici da un kilogrammo. Dopo averci riflettuto, decide di misurare il tempo di oscillazione del suo zaino e quello di un peso-campione. Se il suo zaino ha massa 2 kg, pensa, il suo tempo di oscillazione sarà il doppio di quello di peso-campione. Pensi che abbia ragione? C'è un altro metodo per misurare la massa del suo zaino?
- 5** Forza, massa e accelerazione: quali coppie di queste grandezze sono direttamente proporzionali e quali inversamente proporzionali?
- 6** In base al secondo principio della dinamica, se la somma delle forze applicate a un corpo è nulla, esso non accelera e, viceversa, se il corpo non accelera la somma delle forze a esso applicate è nulla. Poiché questo è anche quanto affermato dal principio di inerzia, ciò significa che il prin-

cipio di inerzia è superfluo e potrebbe essere omesso?

- 7** Dopo avere studiato il terzo principio della dinamica, Giulia pensa: «Se un camion traina un rimorchio, la forza che il camion esercita sul rimorchio è uguale e contraria alla forza che il rimorchio esercita sul camion, perché si tratta di forze di azione e reazione. La somma di queste due forze è zero, per cui il rimorchio non può mettersi in movimento». Trova l'errore nel ragionamento di Giulia.

PROBLEMI

2 IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ GALILEIANA

- 1** ★★ Un'auto viaggia verso nord con una velocità di modulo 35 km/h. Un caravan viaggia verso ovest con una velocità di modulo 42 km/h.

► Qual è la velocità del caravan secondo il guidatore dell'auto?

[15 m/s, verso sud-ovest]

- 2** ★★ Dario sale i gradini di una scala mobile, che a sua volta sale alla velocità di 0,60 m/s. La scala mobile è lunga 18 m e Dario impiega 9,0 s a salire dal piano inferiore a quello superiore.

► Con quale velocità Dario sale lungo la scala mobile?

[1,4 m/s]

3 PROBLEMA SVOLTO

★★★

Una motocicletta, che viaggia su una strada rettilinea alla velocità costante di 45,1 km/h, sorpassa una bicicletta che procede nello stesso verso con una velocità costante di 21,3 km/h.

- Scrivi la legge del moto della motocicletta nel sistema di riferimento della strada, scegliendo come $t = 0$ s e $s = 0$ m, rispettivamente, l'istante di tempo e la posizione in corrispondenza dei quali avviene il sorpasso.
- Ricava la legge del moto della motocicletta anche nel sistema di riferimento della bicicletta (cioè quello in cui la bicicletta è ferma).





■ Strategia e soluzione

- Chiamiamo S il sistema di riferimento della strada e S' quello della bicicletta. La velocità della motocicletta in S è $v = 45,1 \text{ km/h} = 12,5 \text{ m/s}$. La velocità della bicicletta (cioè quella del riferimento S') rispetto a S è $V = 21,3 \text{ km/h} = 5,92 \text{ m/s}$.

- La legge del moto della motocicletta nel riferimento S è:

$$s = vt. \quad (*)$$

Abbiamo così risposto alla prima domanda del problema.

- Anche in S' scegliamo $t' = 0$ s e $s' = 0$ m in modo che corrispondano all'istante e alla posizione del sorpasso. Possiamo così usare le formule (2) con i soli moduli perché il moto è lungo una retta:

$$\begin{cases} s' = s - Vt \\ t' = t \end{cases}$$

- Sostituiamo al posto di s il valore dato dalla formula (*):

$$\begin{cases} s' = vt - Vt \\ t' = t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s' = vt' - Vt' \\ t' = t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s' = (v - V)t' \\ t' = t \end{cases}$$

- La legge del moto della motocicletta nel riferimento S' è quindi data da $s' = (v - V)t' = (12,5 \text{ m/s} - 5,92 \text{ m/s})t' = (6,6 \text{ m/s})t'$.

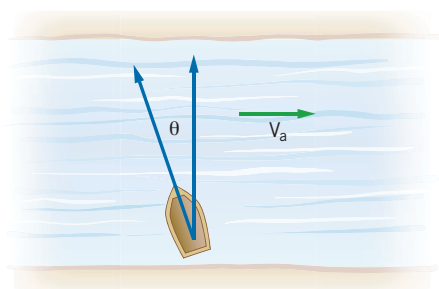
■ Discussione

Nel sistema di riferimento S' , in cui la bici è ferma, la motocicletta si muove di moto rettilineo uniforme con una velocità di modulo $v' = v - V = 6,6 \text{ m/s}$. A conferma della correttezza dei calcoli, questo è proprio il valore di velocità che si ottiene utilizzando la seconda delle formule (3).

- 4** ★★★ Una barca può muoversi a una velocità di 10 km/h rispetto all'acqua di un fiume che scorre a $5,0 \text{ km/h}$. Il barcaiolo vuole attraversare il fiume perpendicolarmente alle rive, come mostrato nella figura.

- ▶ Secondo quale angolo deve orientare la sua barca?
- ▶ Con quale velocità rispetto al terreno deve muoversi?

(Adattato dalle *Olimpiadi della fisica, gara nazionale di primo livello, 2000*)



[30° ; $2,4 \text{ m/s}$]

- 5** ★★★ Carla è seduta nello scompartimento di un treno che viaggia alla velocità di 68 km/h lungo un tratto

rettilineo. Guardando fuori dal finestrino vede delle gocce di pioggia, che scendono a velocità costante, con componenti $v_x = -16 \text{ m/s}$ e $v_y = 3,0 \text{ m/s}$.

- ▶ Quanto vale la velocità delle gocce di pioggia misurata da un osservatore che si trova a terra?

[$4,2 \text{ m/s}$]

- 6** ★★★ Un turista cammina alla velocità di $3,6 \text{ km/h}$, in direzione della prua, sul ponte di una nave da crociera che si muove alla velocità costante di 36 km/h . Nello stesso verso di marcia della nave, $5,0 \text{ km}$ più avanti, vede un peschereccio che naviga alla velocità costante di 18 km/h .

- ▶ Scrivi la legge del moto del peschereccio nel sistema di riferimento del turista che cammina sul ponte della nave.

[$s = 5,0 \times 10^3 \text{ m} - 6,0 \text{ m/s} \cdot t$]

- 7** ★★★ Luca sta nuotando lentamente in piscina mentre vede Federica venirgli incontro, nella corsia accanto, alla velocità di $1,8 \text{ m/s}$. Quando Federica raggiunge il bordo della piscina, inverte il suo

ESERCIZI

moto mantenendo il modulo della velocità costante e poi sorpassa Luca, che la vede passare alla velocità di 0,80 m/s. Durante tutto questo tempo Luca ha mantenuto la sua velocità costante.

► Quali sono, in modulo, le velocità di Luca e Federica?

[0,50 m/s; 1,3 m/s]

4 IL SECONDO E IL TERZO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

8

★★★

PROBLEMA SVOLTO

Un lampadario a molla di 4,4 kg viene montato al soffitto. La molla ha costante elastica 480 N/m e lunghezza a riposo di 18 cm. Dopo essere stato montato, il lampadario viene lasciato scendere gradualmente.

► A che distanza dal soffitto si trova il lampadario?

■ Strategia e soluzione

- Dopo che il lampadario è stato montato e lasciato scendere, esso è fermo, ma sottoposto a due forze: una è la forza-peso \vec{F}_p , diretta verso il basso, e la seconda è la forza elastica $\vec{F}_e = -k\Delta\vec{x}$ della molla, diretta verso l'alto. Nell'espressione della forza elastica k è la costante elastica e Δx è l'allungamento della molla. In virtù del secondo principio della dinamica la somma vettoriale di queste due forze è nulla,

$$F_e - F_p = ma = 0$$

- Da questa relazione ricaviamo l'intensità della forza elastica esercitata dalla molla

$$F_e = F_p = mg = (4,4 \text{ kg}) \times (9,8 \text{ m/s}^2) = 43 \text{ N}$$

per cui l'allungamento della molla è

$$\Delta x = \frac{F_e}{k} = \frac{43 \text{ N}}{480 \text{ N/m}} = 0,090 \text{ m} = 9,0 \text{ cm}$$

Quindi la distanza del lampadario dal soffitto è

$$L = L_0 + \Delta x = 18 \text{ cm} + 9,0 \text{ cm} = 27 \text{ cm}$$

■ Discussione

Ogni molla ha una sua lunghezza *a riposo* L_0 , quando non è sottoposta ad alcuna forza, mentre ha lunghezza variabile L quando è sottoposta a forze. L'intensità della forza elastica che la molla esercita non è proporzionale né a L_0 né a L , ma a $\Delta r = |L - L_0|$.

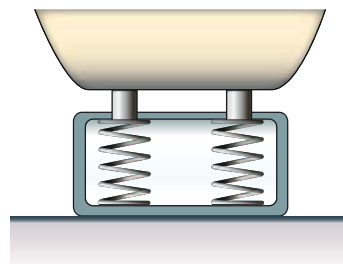
9

★★★

Una bilancia da cucina ha al suo interno due molle parallele, di costante elastica 250 N/m. La ditta che la produce vuole sostituire le due molle con un'unica molla, della stessa lunghezza, in modo tale che la bilancia funzioni allo stesso modo.

► Quanto deve valere la costante elastica della nuova molla?

[500 N/m]



- 10** ★★★ Una forza di 40 N applicata a un tavolo vuoto posto su un pavimento privo di attrito produce un'accelerazione di $3,4 \text{ m/s}^2$. Sul tavolo vengono posti 10 libri, e il tavolo su cui agisce la stessa forza acquista ora un'accelerazione di $2,4 \text{ m/s}^2$.

► Determina la massa totale dei libri.

[4,9 kg]

- 11** ★★★ Uno studio di ingegneria specializzato in locomotive deve verificare le caratteristiche di una motrice di massa $m_1 = 3,6 \times 10^4 \text{ kg}$, che può trainare tre vagoni passeggeri, ciascuno di massa m_p , pari a un terzo di m_1 , con accelerazione costante di $0,1 \text{ m/s}^2$. L'azienda ferroviaria intende utilizzarla per trainare vagoni merci di massa m_m pari alla metà di m_1 con la stessa accelerazione.

► Calcola quanti vagoni merci può trainare il motore della locomotiva.

[2]

- 12** ★★★ Uno scatolone di 5,6 kg ha ricevuto una spinta e ora striscia sul pavimento finché va a urtare contro un'estremità di una molla orizzontale, di massa trascurabile e costante elastica 320 N/m . L'altro capo della molla è fissato al muro. Tra lo scatolone e il pavimento è presente attrito, con coefficiente di attrito dinamico 0,10.

► Qual è l'accelerazione dello scatolone quando ha compresso la molla di $2,0 \text{ cm}$?

► Quanto vale in quell'istante la forza che lo scatolone esercita sulla molla?

[$2,1 \text{ m/s}^2$; $6,4 \text{ N}$]

- 13** ★★★ Su un montacarichi di massa 16 kg si trova una bilancia da cucina di massa 3,0 kg. Sul suo piatto viene appoggiato un pacco di zucchero da 1,0 kg. Il montacarichi viene tirato verso l'alto con una forza di 220 N. Trascura l'effetto dell'aria.

► Che valore indica la bilancia?

[1,1 kg]

- 14** ★★★ Un ascensore di massa 450 kg è tirato verso l'alto da una forza di intensità 6000 N. Un uomo di 75,0 kg si trova all'interno dell'ascensore.

► Qual è l'intensità della forza che l'ascensore esercita sull'uomo?

► E quella della forza che l'uomo esercita sull'ascensore?

[$8,6 \times 10^2 \text{ N}$; $8,6 \times 10^2 \text{ N}$]

PROBLEMI GENERALI

- 1** ★★★ Su un treno che si muove lungo un binario rettilineo alla velocità di 48 km/h, un bambino in fondo a un vagone dà un calcio a un pallone verso la testa del vagone alla velocità di 2,0 m/s. Il vagone è lungo 16 m.

► Rispetto a un osservatore a terra, quanto vale la distanza percorsa dalla palla quando arriva alla testa del vagone?

[$1,2 \times 10^2 \text{ m}$]

- 2** ★★★ Martina nuota in un fiume seguendo il verso della corrente, che scorre alla velocità di 1,8 m/s. Così facendo, Martina impiega 16 s a percorrere la distanza di 96 m che separa un ponte da un altro. Raggiunto il secondo ponte, Martina si volta e risale il fiume nuotando con la stessa velocità.

► Qual è la velocità di Martina rispetto al fiume?

► Quanto tempo impiega per tornare al primo ponte?

[4,2 m/s; 40 s]

- 3** ★★★ Andrea e Beatrice si trovano sul ponte di una nave che viaggia alla velocità di 11 m/s, a distanza di 6 m l'uno dall'altra, e si lanciano una palla che impiega 3 s per percorrere la distanza che li separa. Giovanni si trova su una seconda nave che viaggia parallelamente alla prima, e osserva che la palla si sposta di 12 m quando Andrea, che si trova a poppa, lancia la palla a Beatrice che si trova a prua.

► Con quale velocità si muove la nave su cui viaggia Giovanni?

► Qual è la velocità della palla secondo Giovanni quando Beatrice la lancia ad Andrea?

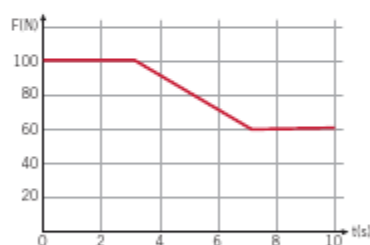
[9 m/s; 0 m/s]

- 4** ★★★ Una slitta di 160 kg viene trainata da una muta di cani, che esercitano una forza $F(t)$ variabile nel tempo, come riportato nel grafico sottostante. Tra la slitta e il terreno innevato è presente attrito, con coefficiente di attrito dinamico $\mu = 0,051$.

ESERCIZI

La slitta è inizialmente già in movimento.

- In quale intervallo di tempo l'accelerazione della slitta è positiva? In quale negativa?
- Calcola le accelerazioni della slitta negli intervalli di tempo in cui essa è costante.



[Nei primi 5 s; da 5 s a 10 s; $0,13 \text{ m/s}^2$; $-0,13 \text{ m/s}^2$]

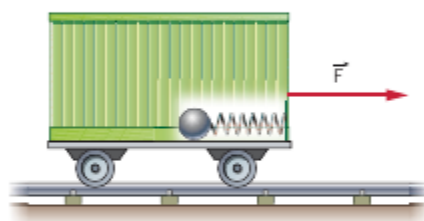
- 5** Un uomo, di massa 75 kg, si trova sopra una bilancia pesapersona all'interno di un ascensore, che scende con un'accelerazione di $0,39 \text{ m/s}^2$.

- Quanti kilogrammi indica la bilancia?

[72 kg]

- 6** Un carrello di massa 24 kg è posto su una superficie priva di attrito ed è tirato da una forza orizzontale di 200 N. All'estremità anteriore del carrello è collegata una molla di massa trascurabile, di costante elastica 150 N/m e lunghezza a riposo di 20 cm. All'altro capo della molla è collegata una palla, di massa 2,0 kg, come mostrato nella figura. La palla è ferma, in posizione di equilibrio.

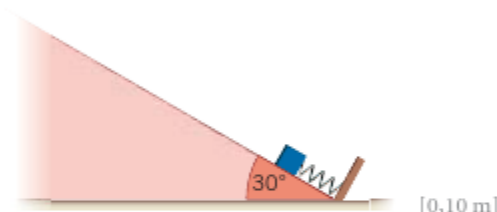
- La molla è dilatata o compressa? Di quanto?



[La molla è dilatata di 10 cm]

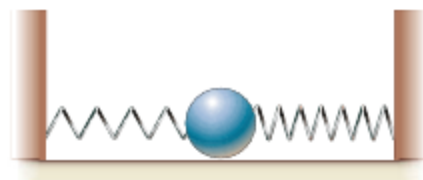
- 7** Un cubo di massa 340 g si trova su un piano inclinato all'estremità di una molla di costante elastica 140 N/m e lunghezza a riposo 12 cm. La seconda estremità della molla è fissata a un supporto al termine del piano inclinato, come mostrato nella figura. Il piano è inclinato di 30° e il suo attrito con il cubo è trascurabile.

- Quanto deve essere lunga la molla affinché, una volta rilasciata, il cubo parta con accelerazione $3,2 \text{ m/s}^2$?



- 8** Una palla di massa 2 kg e raggio 5 cm è collegata a due molle, di costanti elastiche rispettivamente 200 N/m e 400 N/m, come mostrato nella figura. La lunghezza a riposo della molla di sinistra è 30 cm, quella della molla di destra è 40 cm. La distanza tra i due estremi delle molle ancorati a sostegni fissi è 1 m. La palla viene posta a metà strada tra i due sostegni fissi e lasciata libera.

- In quale direzione inizierà a muoversi e con quale accelerazione?



[5 m/s^2 , verso sinistra]

- 9** Una molla di massa trascurabile, costante elastica 130 N/m e lunghezza a riposo di 16 cm è posta verticalmente su un tavolo. Sopra di essa è appoggiato un cubetto di piombo di massa 200 g, che spinge in basso la molla fino a una lunghezza di 10 cm.

- Quanto vale l'accelerazione iniziale del cubetto lasciato libero?
- Quanto vale la forza che la molla esercita sul cubetto prima della partenza del cubetto?

[29 m/s^2 ; 7,8 N]

QUESITI PER L'ESAME DI STATO

Rispondi ai quesiti in un massimo di 10 righe.

- 1** Esponi i concetti di sistema di riferimento inerziale e di sistema di riferimento non inerziale aiutandoti con degli esempi.

2 Enuncia il primo principio della dinamica e illustra una sua possibile verifica sperimentale.

3 Enuncia il secondo principio della dinamica e illustra una sua possibile verifica sperimentale.

4 Enuncia il terzo principio della dinamica e illustra una sua possibile verifica sperimentale.

TEST PER L'UNIVERSITÀ

1 Un astronauta si pesa sulla Terra e la bilancia segna circa 800 N. L'esperienza viene ripetuta sulla Luna e in questo caso la bilancia segna circa 130 N. A quale delle seguenti ragioni è dovuta tale differenza?

- A** L'accelerazione di gravità sulla Luna è inferiore a quella sulla Terra.
- B** La massa dell'uomo sulla Luna è inferiore a quella sulla Terra.
- C** La bilancia si è rotta durante il viaggio. Il peso dell'astronauta non cambia.
- D** La Luna ruota intorno al proprio asse con velocità angolare inferiore rispetto a quella della Terra.
- E** Sulla Luna non c'è l'atmosfera e dunque la pressione è nulla.

(Prova di ammissione al corso di laurea in Scienze Motorie, 2009/2010)

2 Il Titanic aveva una massa di 6×10^7 chilogrammi. Quale forza applicata era necessaria per imprimere un'accelerazione di 0,1 metri al secondo per secondo (senza tener conto degli attriti a cui poteva essere sottoposto)?

- A** $6 \times 10^7 \times 0,1 = 6 \times 10^6$ newton
- B** $6 \times 10^7 / 0,1 = 6 \times 10^8$ newton
- C** $6 \times 10^7 \times 9,8 = 5,9 \times 10^8$ newton
- D** $6 \times 10^7 \times 9,8 \times 0,1 = 5,9 \times 10^7$ newton
- E** Una forza pari al suo peso.

(Prova di ammissione al corso di laurea in Medicina Veterinaria, 2008/2009)

PROVE D'ESAME ALL'UNIVERSITÀ

1 Il motore di un modellino d'aereo di 2 kg esercita sull'aereo una forza di 10 N. Se l'aereo accelera a 3 m/s^2 , qual è il modulo della forza della resistenza dell'aria che agisce sull'aereo?

- A** $F = 4 \text{ N}$
- B** $F = 6 \text{ N}$
- C** $F = 8 \text{ N}$
- D** $F = 12 \text{ N}$
- E** $F = 16 \text{ N}$

(Esame di Fisica, Corso di laurea in CTF, Università La Sapienza di Roma, 2003/2004)

2 Una stessa forza F agisce dapprima sul corpo m_1 e poi sul corpo m_2 . Si nota che l'accelerazione del primo corpo è esattamente il doppio di quella del secondo corpo. In questo caso quale sarà il rapporto tra le masse dei due corpi definito come $R = m_2 / m_1$?

- A** $R = 2$
- B** $R = 1/2$
- C** $R = 4$
- D** $R = 1/4$
- E** $R = 1$

(Esame di Fisica, Corso di laurea in Tossicologia, Università La Sapienza di Roma, 2002/2003)

STUDY ABROAD

1 **STATEMENT 1:** For an observer looking out through the window of a fast moving train, the nearby objects appear to move in the opposite direction to the train, while the distant objects appear to be stationary.

STATEMENT 2: If the observer and the object are moving at velocities \vec{V}_1 and \vec{V}_2 respectively with reference to a laboratory frame, the velocity of the object with respect to the observer is $\vec{V}_2 - \vec{V}_1$.

- A** Statement 1 is true, Statement 2 is true; Statement 2 is a correct explanation for Statement 1.
- B** Statement 1 is true, Statement 2 is true; Statement 2 is NOT a correct explanation for Statement 1.
- C** Statement 1 is true, Statement 2 is false.
- D** Statement 1 is false, Statement 2 is true.

(Joint Entrance Examination for Indian Institutes of Technology (JEE), India, 2008/2009)