CAPITOLO

13

I tre principi della dinamica

«Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioè perpetuo?» — Galileo Galilei, Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (1632), Giornata seconda

OBIETTIVI

1. Ricostruire il passaggio dalla fisica di Aristotele, attraverso l'impetus, al principio d'inerzia di Galileo e Newton.
2. Enunciare e applicare il primo principio della dinamica e riconoscere i sistemi di riferimento inerziali.
3. Spiegare il principio di relatività galileiana e usare le trasformazioni di Galileo per comporre le velocità.
4. Applicare il secondo principio della dinamica, con la forza risultante e un diagramma di corpo libero, a problemi diretti e inversi.
5. Distinguere massa inerziale e massa gravitazionale e interpretare $P = m\,g$ come caso del secondo principio.
6. Riconoscere le coppie di azione e reazione e usare il terzo principio per spiegare camminare, remare e la propulsione a razzo.

INDICE DEL CAPITOLO

13.1 Da Aristotele a Galileo: che cosa mantiene un corpo in moto 2

13.2 Il primo principio della dinamica 4

13.3 Sistemi di riferimento inerziali e relatività galileiana 6

13.4 Il secondo principio della dinamica 9

13.5 Il terzo principio della dinamica 12

Fisica 3 · Parte V · I principi della dinamica · versione 1.0
Capitolo 13: I tre principi della dinamica · pagine 327–348 del volume completo · estratto per lo studio

Spingi un carrello della spesa vuoto e lascialo andare: rallenta e si ferma dopo pochi metri. Spingi un disco da hockey sul ghiaccio: scivola per decine di metri. Una sonda lanciata nello spazio, lontano dai pianeti, viaggia per anni con i motori spenti. Che cosa serve, allora, per muovere un corpo? Una forza che lo spinga di continuo, come suggerisce il carrello, o niente del tutto, come suggerisce la sonda?

Nei capitoli 10, 11 e 12 abbiamo descritto i moti senza chiederci che cosa li produce. Ora poniamo la domanda del «perché». La parte della meccanica che studia il moto in relazione alle sue cause, le forze, è la **dinamica**, e poggia su tre leggi che Isaac Newton pose all'inizio dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687). Per arrivarci ci sono voluti duemila anni, e gli errori del passato sono gli stessi che il nostro intuito commette ancora oggi.

13.1 Da Aristotele a Galileo: che cosa mantiene un corpo in moto

13.1.1 Aristotele: ogni moto ha un motore

Per Aristotele (384–322 a.C.), come hai visto nel capitolo 1, i moti sono naturali o violenti: il sasso che cade verso il centro della Terra si muove per natura, il carro tirato dai buoi per violenza, e si ferma appena i buoi si fermano. Nella *Fisica* Aristotele pone un principio generale: «Ἅπαν τὸ κινούμενον ὑπό τινος ἀνάγκη κινεῖσθαι», «tutto ciò che si muove è necessariamente mosso da qualcosa» (VII 1, 241b34; traduzione della redazione). Nei moti violenti il motore deve stare a contatto con il corpo e agire finché il moto dura.

Non è un'idea ingenua: nel mondo di tutti i giorni gli attriti sono ovunque, e ogni moto lasciato a sé si spegne. Il limite di Aristotele fu prendere quegli attriti per una legge della natura.

Restava un caso difficile: il proiettile. Una pietra lanciata continua a volare dopo aver lasciato la mano: chi la spinge? Alcuni sostenevano l'**antiperistasi** (ἀντιπερίστασις, «sostituzione reciproca»): l'aria spostata davanti alla pietra le girerebbe intorno e la spingerebbe da dietro. Aristotele preferisce un'altra spiegazione (*Fisica* VIII 10): il lanciatore mette in moto anche l'aria vicina e le trasmette la capacità di muovere, che passa di strato in strato indebolendosi finché il moto cessa. In entrambi i casi il motore del proiettile è il mezzo.

APPROFONDIMENTO

Filopono, Buridano e l'*impetus*

Nel VI secolo Giovanni Filopono, commentando la *Fisica* ad Alessandria, obiettò che se fosse l'aria a spingere la pietra basterebbe agitare l'aria intorno a una pietra ferma per farla volare, e questo non accade. Propose che chi lancia imprima al proiettile stesso una forza motrice incorporea, che si consuma poco a poco.

Nel XIV secolo, a Parigi, Giovanni Buridano chiamò questa qualità impressa **impetus**: tanto maggiore quanto più materia contiene il corpo e quanto più velocemente è lanciato, durerebbe indefinitamente se la resistenza dell'aria e la tendenza del corpo verso il basso non lo consumassero. L'impetus è vicino all'inerzia, ma non coincide: per Buridano il moto ha ancora bisogno di una causa, interna al corpo; per il principio d'inerzia il moto rettilineo uniforme non ne ha bisogno.

13.1.2 Galileo: l'attrito nasconde l'inerzia

Galileo Galilei (1564–1642) rovescia la domanda: non che cosa mantiene in moto un corpo, ma che cosa lo ferma; e ragiona su situazioni ideali, senza attriti. Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632) e nei *Discorsi* (1638) osserva che un pendolo risale quasi all'altezza da cui è partito; nei *Discorsi* aggiunge che ciò accade anche quando il filo si impiglia in un chiodo e la pallina risale lungo un arco diverso, e ammette come postulato che lo stesso valga per una palla che scende lungo un piano inclinato liscio e risale lungo un altro.

Ne nasce il celebre **esperimento mentale dei due piani inclinati** (Figura 13.1). Senza attrito la palla risale sul secondo piano esattamente fino all'altezza h di partenza; se la pendenza del secondo piano diminuisce, per tornare a quell'altezza deve percorrere un tratto sempre più lungo. Se il secondo piano è orizzontale, la palla non raggiungerà mai l'altezza di partenza e non avrà alcun motivo di fermarsi: si muoverà per sempre con velocità costante.

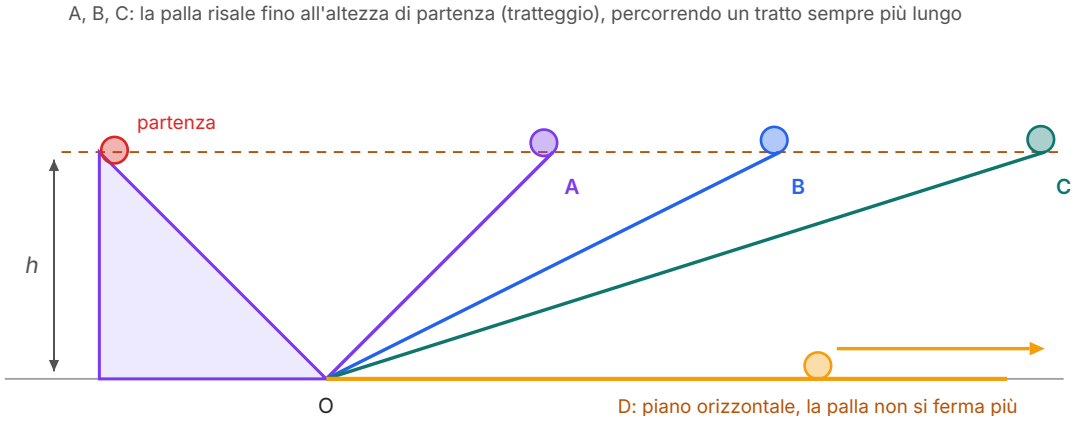


Figura 13.1 L'esperimento mentale dei due piani inclinati (schema, attriti trascurati). La palla parte da ferma all'altezza *h* e, dopo il punto più basso O, risale sui piani A, B e C fino alla stessa altezza, percorrendo un tratto tanto più lungo quanto minore è la pendenza. Sul piano orizzontale D non può più tornare all'altezza di partenza: si muove indefinitamente con velocità costante.

Nel *Dialogo* Salviati, portavoce di Galileo, conduce Simplicio, difensore di Aristotele, fino a questa conclusione. Una palla spinta su una superficie né in salita né in discesa durerebbe a muoversi, ammette Simplicio, «tanto quanto durasse la lunghezza di quella superficie nè erta nè china»; e Salviati: «Adunque se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimente senza termine, cioè perpetuo?» (Giornata seconda; Edizione Nazionale, vol. VII).

Il carrello si ferma perché è frenato dall'attrito, una forza come le altre (capitolo 6), che nascondeva ad Aristotele una legge semplicissima. Per esattezza: Galileo pensava la superficie «né erta né china» come una superficie sempre alla stessa distanza dal centro della Terra; il principio per il moto in linea retta fu enunciato, fra gli altri, da Cartesio, e poi da Newton.

13.2 Il primo principio della dinamica

13.2.1 L'enunciato di Newton

La prima delle leggi del moto di Newton, nel testo della terza edizione dei *Principia* (1726), dice: «*Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.*», «ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto uniforme in linea retta, se non in quanto è costretto da forze impresse a mutare quello stato» (traduzione della redazione). In linguaggio moderno è il **primo principio della dinamica**, o **principio d'inerzia**:

DA RICORDARE

Primo principio della dinamica. Se la forza risultante che agisce su un corpo è nulla, il corpo resta in quiete, se era fermo, o si muove di moto rettilineo uniforme, se era in moto. Viceversa, se un corpo è fermo o in moto rettilineo uniforme, la risultante delle forze su di esso è nulla.

$$\boldsymbol{R} = 0 \iff \boldsymbol{v} \text{ costante}$$

La proprietà dei corpi di conservare il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme si chiama **inerzia**; vedremo che la massa ne è la misura.

13.2.2 Che cosa dice, e che cosa non dice

Per la dinamica la quiete e il moto rettilineo uniforme sono lo stesso stato: velocità costante. Una forza non serve a *mantenere* la velocità, ma a *cambiarla*, nel modulo, nella direzione o nel verso. Un corpo che curva, anche a velocità di modulo costante, non è in moto rettilineo uniforme: su di esso la risultante non è nulla.

Il principio chiude anche un discorso del capitolo 7, dove abbiamo chiamato equilibrio la condizione di un corpo fermo con risultante nulla. La stessa condizione, $\boldsymbol{R} = 0$, vale per un corpo in moto rettilineo uniforme: un'auto a 90 km/h costanti su un rettilineo è in equilibrio quanto un'auto parcheggiata. La spinta della strada sulle ruote motrici equilibra esattamente la resistenza dell'aria e gli attriti; non li «supera», altrimenti l'auto accelererebbe.

ERRORE FREQUENTE

«Se un corpo si muove, su di lui agisce una forza nel verso del moto.» È l'idea di Aristotele, e il nostro intuito la ripete di continuo. Sul disco da hockey che scivola agiscono il peso e la reazione del ghiaccio, che si equilibrano, e un piccolo attrito *contrario* al moto: niente lo spinge in avanti. La forza è legata al *cambiamento* della velocità, non alla velocità; e una risultante nulla non significa che il corpo è fermo, ma che la sua velocità non cambia.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Dinamica viene dal greco δύναμις, «forza, potenza». Ma in Aristotele δύναμις è soprattutto la *potenza* come possibilità, ciò che una cosa può diventare, contrapposta all'atto; il significato di «forza» della fisica moderna è successivo.

Inerzia viene dal latino *inertia*, da *iners*, «inattivo», composto di *in-* e *ars*: chi è «senza arte», senza attività. Nei *Principia* Newton parla di una *vis inertiae*, una «forza d'inerzia» con cui ogni corpo resiste al cambiamento del proprio stato; oggi diciamo che l'inerzia è una proprietà, non una forza.

13.3 Sistemi di riferimento inerziali e relatività galileiana

13.3.1 Il primo principio non vale per tutti gli osservatori

Sei in piedi in un autobus che viaggia a velocità costante. L'autista frena e una bottiglia appoggiata sul pavimento rotola in avanti, senza che alcuna forza orizzontale la spinga: per te il primo principio sembra violato. Un passante fermo sul marciapiede non vede alcun mistero: la bottiglia si muoveva con l'autobus e, poiché sul pavimento liscio nessuna forza orizzontale apprezzabile agisce su di lei, continua per inerzia con la velocità che aveva. È l'autobus che rallenta sotto di lei.

Il primo principio vale dunque per alcuni osservatori e non per altri. Un **sistema di riferimento inerziale** è un sistema di riferimento in cui vale il principio d'inerzia. Il suolo lo è con ottima approssimazione per quasi tutti i fenomeni che studieremo; un veicolo che frena, accelera o curva no. I sistemi non inerziali sono l'argomento del capitolo 14.

13.3.2 La nave di Galileo

Ogni sistema che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema inerziale è anch'esso inerziale. Galileo si chiese se dall'interno di un tale sistema ci si possa accorgere del moto, e nella Giornata seconda del *Dialogo* rispose con un esperimento immaginato sotto coperta (la Figura 13.2 ne schematizza un dettaglio):

«Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; [...] sospendasi 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 [...]. Fate muover la nave con quanta si voglia velocità; chè (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 [...]; le gocciole cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una

verso poppa, benchè, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi». (G. Galilei, *Dialogo*, Giornata seconda; Edizione Nazionale, vol. VII, pp. 212–213)

La causa, spiega Salviati, è «l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora»: la goccia, staccandosi dal secchiello, ha già la velocità orizzontale della nave e la conserva per inerzia mentre cade.

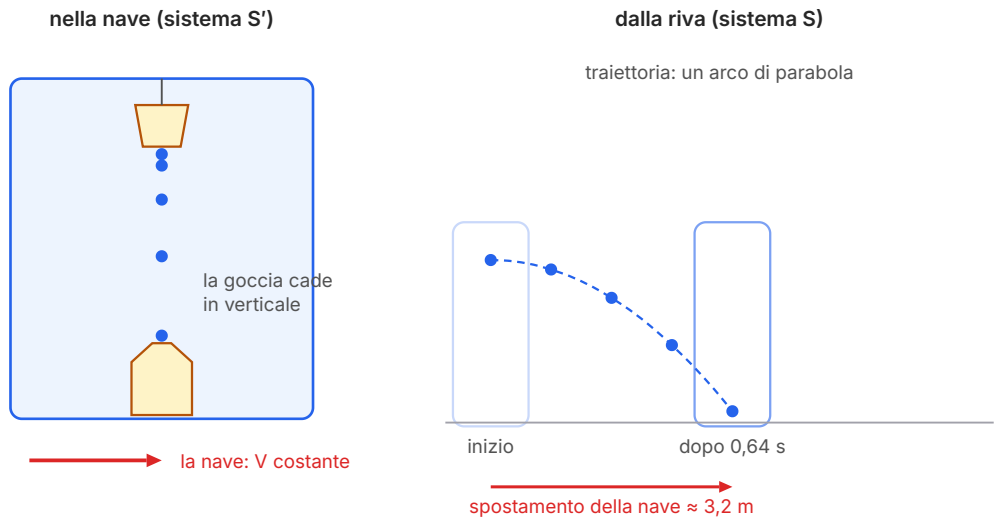


Figura 13.2 Una goccia cade da un'altezza di 2,0 m nella cabina di una nave che si muove a 5,0 m/s in linea retta e con velocità costante. Per chi è nella nave la goccia cade in verticale, come a nave ferma; per chi la osserva dalla riva descrive un arco di parabola, perché conserva la velocità orizzontale della nave, e arriva nel vaso dopo circa 0,64 s, quando la nave ha percorso circa 3,2 m. Le posizioni della goccia sono disegnate a intervalli di tempo uguali.

È il **principio di relatività galileiana**: **le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali**, e nessun esperimento di meccanica eseguito all'interno di un sistema inerziale permette di stabilire se esso è fermo o in moto rettilineo uniforme. «Fermo» e «in moto uniforme» non sono proprietà assolute, ma dipendono dal sistema scelto.

13.3.3 Le trasformazioni di Galileo

Rendiamo quantitativo il principio per il moto lungo una retta. Il sistema S è fisso al suolo, con origine O; il sistema S′ è fisso a un vagone che si muove lungo lo stesso asse x con velocità costante V, e ha origine O′ (Figura 13.3). Se gli orologi partono quando O′ passa per O, dopo un tempo t l'origine O′ dista $V\,t$ da O, e un punto P che nel vagone ha posizione x' ha rispetto al suolo posizione $x = x' + V\,t$. Sono le **trasformazioni di Galileo**:

$$x' = x - V\,t \qquad t' = t$$

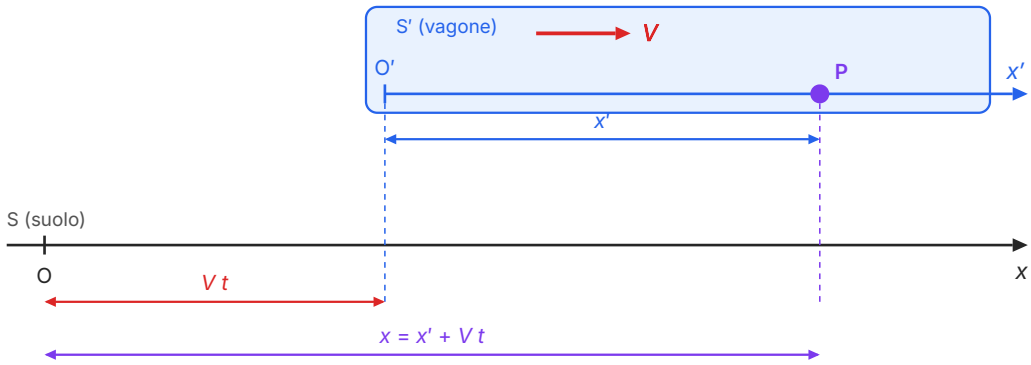


Figura 13.3 Le trasformazioni di Galileo. Il sistema S′ (il vagone) si muove con velocità costante V rispetto al sistema S (il suolo); al tempo $t = 0$ le due origini O e O′ coincidevano. La posizione di P rispetto al suolo è la somma della sua posizione nel vagone e della distanza $V\,t$ percorsa dal vagone.

La seconda relazione dice che in meccanica classica il tempo è lo stesso per tutti gli osservatori. Dividendo gli spostamenti per l'intervallo di tempo si ottiene la composizione delle velocità del capitolo 12:

$$v' = v - V \qquad \text{ovvero} \qquad v = v' + V$$

Ora il passo decisivo. Poiché V è costante, una variazione Δv della velocità di P nel suolo è uguale alla variazione $\Delta v'$ nel vagone, e quindi $a' = a$: **tutti gli osservatori inerziali misurano la stessa accelerazione**. Le velocità dipendono dal sistema di riferimento, le accelerazioni no; e poiché, come vedremo, le forze determinano le accelerazioni, le leggi della dinamica hanno la stessa forma in tutti i sistemi inerziali. Vicino alla velocità della luce, però, queste relazioni cessano di valere: servirà la relatività di Einstein, al quinto anno.

ESEMPIO SVOLTO

Camminare in un treno

Problema. Un treno viaggia in rettilineo a 72 km/h costanti; un passeggero cammina a 1,5 m/s rispetto al treno. Qual è la sua velocità rispetto ai binari se va a) verso la testa, b) verso la coda? c) Una pallina che il passeggero lascia cadere ha, rispetto al treno, accelerazione 9,8 m/s^2 verso il basso: quale accelerazione misura chi è fermo sul marciapiede?

Soluzione. Asse nel verso del treno: $V = 72$ km/h $= 72/3{,}6$ m/s $= 20$ m/s, e $v = v' + V$. a) $v = +1{,}5$ m/s $+ 20$ m/s $= 21{,}5$ m/s, circa 77 km/h. b) $v = -1{,}5$ m/s $+ 20$ m/s $= 18{,}5$ m/s: rispetto ai binari il passeggero va comunque nel verso del treno, più lentamente. c) Il treno è un sistema inerziale, quindi le accelerazioni coincidono: 9,8 m/s^2 verso il basso anche per chi è sul marciapiede. Cambia invece la velocità: rispetto al suolo la pallina ha anche una componente orizzontale e descrive un arco di parabola.

COLLEGAMENTI

Storia e filosofia · La nave e il moto della Terra

La nave nasce come argomento in una polemica. Chi negava il moto della Terra sosteneva: se la Terra ruotasse, un sasso lasciato cadere da una torre toccherebbe il suolo lontano dal piede della torre, che nel frattempo si sarebbe spostata; il sasso cade al piede della torre, dunque la Terra è ferma. Galileo risponde che il sasso, come la goccia nella nave, condivide il moto della torre e lo conserva cadendo. L'argomento non prova che la Terra si muove, ma toglie valore a una delle principali obiezioni contro Copernico. Il dibattito fra sistema tolemaico e copernicano lo studierai il prossimo anno, in fisica, filosofia e storia.

13.4 Il secondo principio della dinamica

13.4.1 Forza e accelerazione

Che cosa accade quando la risultante non è nulla? Per scoprirlo serve un esperimento con una forza risultante nota e attriti piccolissimi: un carrello su una rotaia a cuscino d'aria, o su un binario ben livellato, tirato da un filo che passa su una carrucola e regge un corpo appeso. Si misura l'accelerazione e si cambia una sola grandezza alla volta, come nel capitolo 1.

Massa costante, forza variabile. Raddoppiando la forza risultante raddoppia l'accelerazione, triplicandola triplica: nel grafico accelerazione-forza (il laboratorio del capitolo, Figura 13.5) i punti stanno, entro le incertezze, su una retta per l'origine. L'accelerazione è direttamente proporzionale alla forza, $a \propto F$.

Forza costante, massa variabile. Caricando il carrello, con la stessa forza l'accelerazione diminuisce: con massa doppia si dimezza. L'accelerazione è inversamente proporzionale alla

massa, $a \propto 1/m$: sono le proporzionalità del capitolo 4.

ESEMPIO SVOLTO

Riconoscere una proporzionalità inversa

Dati. Un carrello è tirato da una forza risultante costante di 0,40 N; cambiando il carico, un gruppo misura le accelerazioni della Tabella 13.1. Che legge lega a e m?

Tabella 13.1 Accelerazione di un carrello tirato da una forza risultante costante di 0,40 N, al variare della massa (dati tipici). Le ultime due colonne sono calcolate.

m (kg)	a (m/s²)	$m \cdot a$ (kg·m/s²)	$1/m$ (kg⁻¹)
0,20	1,98	0,396	5,00
0,40	1,01	0,404	2,50
0,50	0,79	0,395	2,00
0,80	0,51	0,408	1,25
1,00	0,40	0,400	1,00

Analisi. Quando la massa raddoppia (da 0,20 a 0,40 kg) l'accelerazione circa si dimezza; quando quintuplica (da 0,20 a 1,00 kg) diventa circa un quinto. Il prodotto $m\,a$ resta fra 0,395 e 0,408 kg·m/s², cioè costante entro le incertezze, circa 0,40 kg·m/s²: come nel capitolo 4, un prodotto costante indica una proporzionalità inversa. Riportando a in funzione di $1/m$ i punti stanno su una retta per l'origine, di pendenza circa 0,40 kg·m/s².

Conclusione. $a \propto 1/m$, e la costante $m\,a \approx 0{,}40$ kg·m/s² coincide con il valore della forza, 0,40 N. Non è una coincidenza: è il secondo principio.

13.4.2 L'enunciato

Mettendo insieme le due proporzionalità, $a \propto F/m$; con le unità del SI la costante di proporzionalità vale 1.

DA RICORDARE

Secondo principio della dinamica. Se su un corpo di massa m agisce una forza risultante $\boldsymbol{F}$, il corpo acquista un'accelerazione $\boldsymbol{a}$ con la stessa direzione e lo stesso verso della risultante e modulo direttamente proporzionale a essa e inversamente proporzionale alla massa:

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} \quad \text{ovvero} \quad \boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{F}}{m}$$

È il **secondo principio della dinamica**, o legge fondamentale della dinamica. Newton lo enunciò così: «*Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur*», «il cambiamento del moto è proporzionale alla forza motrice impressa, e avviene lungo la retta secondo la quale quella forza è impressa» (traduzione della redazione). Il «moto» di Newton è il prodotto della massa per la velocità, una grandezza del prossimo anno; per un corpo di massa costante il suo enunciato equivale al nostro.

1. $\boldsymbol{F}$ è la forza risultante, la somma vettoriale (capitolo 5) di tutte le forze sul corpo: peso, reazioni, tensioni, attriti. Se è nulla, l'accelerazione è nulla e si ritrova il primo principio.

2. $\boldsymbol{a}$ ha la direzione di $\boldsymbol{F}$, non necessariamente quella di $\boldsymbol{v}$. La forza determina come *cambia* la velocità. Un pallone lanciato verso l'alto sale, ma la risultante (il peso, trascurando l'aria) e l'accelerazione sono dirette verso il basso, e infatti il pallone rallenta.

3. La legge è vettoriale: scelti due assi, equivale a $F_x = m\,a_x$ e $F_y = m\,a_y$, dove F_x è la somma delle componenti lungo x di tutte le forze. Su un piano orizzontale, lungo la verticale l'accelerazione è nulla e le forze verticali si equilibrano, come in statica.

13.4.3 La massa inerziale e il newton

A parità di forza, un corpo di massa grande accelera poco: resiste molto al cambiamento della propria velocità, cioè ha molta inerzia. La massa che compare in $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ si chiama **massa inerziale** ed è la misura quantitativa dell'inerzia.

Il secondo principio definisce anche l'unità di forza: **un newton è la forza risultante che imprime a un corpo di 1 kg un'accelerazione di 1 m/s²**, cioè $1\ \text{N} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$. È la definizione promessa nel capitolo 6, coerente con il dinamometro: un corpo di 102 g pesa $0{,}102\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{m/s}^2 \approx 1{,}0\ \text{N}$.

13.4.4 Il peso, rivisto

Un corpo in caduta libera è soggetto, trascurando l'aria, al solo peso $\boldsymbol{P}$; per il secondo principio accelera di $\boldsymbol{P}/m$, e dal capitolo 11 sai che questa accelerazione è $\boldsymbol{g}$, circa $9{,}8\ \text{m/s}^2$ verso il basso. Dunque $\boldsymbol{P} = m\boldsymbol{g}$: la formula del peso del capitolo 6 è il secondo principio con $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{g}$. Per questo la stessa costante si scrive 9,8 N/kg o $9{,}8\ \text{m/s}^2$: le due unità coincidono.

C'è qualcosa di sorprendente. Nel capitolo 2 hai definito la massa con la bilancia a bracci uguali, confrontando i pesi: è una **massa gravitazionale**, che misura quanto un corpo è attratto dalla Terra. La massa inerziale misura invece quanto il corpo resiste ad accelerare. Sono proprietà diverse; eppure, poiché nel vuoto tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione, sono proporzionali, e nel SI uguali. Questa equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale è un fatto osservato con grande precisione, che la meccanica di Newton accetta senza spiegarlo.

13.4.5 Come si risolve un problema di dinamica

1. **Scegli il corpo** di cui studi il moto e trattalo come un punto materiale.

2. **Disegna il diagramma di corpo libero** (capitolo 7): tutte e sole le forze che agiscono *su quel corpo*, ciascuna con il corpo che la esercita.
3. **Scegli gli assi**, di solito uno nel verso dell'accelerazione prevista.
4. **Scrivi il secondo principio per ogni asse** e risolvi; poi, se serve, usa le leggi del moto uniformemente accelerato.
5. **Controlla** unità, ordine di grandezza e segni.

Se dalle forze si ricava l'accelerazione e da questa il moto, si risolve un **problema diretto**; se si misura il moto e se ne deduce la forza risultante, un **problema inverso**, come quando si ricava la forza frenante di un'auto dallo spazio di frenata.

ESEMPIO SVOLTO

La slitta

Problema. Marta, su una slitta, è tirata su una pista di neve orizzontale con una fune orizzontale; la massa di Marta e della slitta è 60 kg. La fune tira con 90 N e la neve oppone un attrito costante di 30 N. a) Calcola l'accelerazione. b) Partendo da ferma, quale velocità ha la slitta dopo 4,0 s, e quanta strada ha fatto? c) A quel punto la fune si spezza: dopo quanto tempo e quanti metri la slitta si ferma?

Diagramma di corpo libero. Sulla slitta agiscono il peso $m\,g$ (Terra), verso il basso; la forza normale $\boldsymbol{N}$ (neve), verso l'alto; la tensione $\boldsymbol{T}$ della fune, in avanti; l'attrito $\boldsymbol{F}_{\text{d}}$ (neve), all'indietro. Asse x nel verso del moto, y verticale.

a) Lungo y: $N - m\,g = 0$. Lungo x: $T - F_{\text{d}} = m\,a$, da cui $a = (90\ \text{N} - 30\ \text{N})/60\ \text{kg} = \mathbf{1{,}0\ m/s^2}$. **b)** $v = a\,t = 1{,}0\ \text{m/s}^2 \times 4{,}0\ \text{s} = \mathbf{4{,}0\ m/s}$; $s = \tfrac{1}{2}\,a\,t^2 = \tfrac{1}{2} \times 1{,}0\ \text{m/s}^2 \times (4{,}0\ \text{s})^2 = \mathbf{8{,}0\ m}$. **c)** Resta solo l'attrito: $a' = -30\ \text{N}/60\ \text{kg} = -0{,}50\ \text{m/s}^2$, opposta alla velocità. La slitta si ferma dopo $t = 4{,}0\ \text{m/s} / 0{,}50\ \text{m/s}^2 = \mathbf{8{,}0\ s}$, percorrendo $\Delta s = (4{,}0\ \text{m/s})^2/(2 \times 0{,}50\ \text{m/s}^2) = \mathbf{16\ m}$.

Controllo. $\text{N/kg} = \text{m/s}^2$. In c) la slitta va avanti mentre la risultante punta indietro.

13.5 Il terzo principio della dinamica

13.5.1 Le forze nascono a coppie

Spingi con la mano contro il muro: senti il muro che spinge la tua mano; se sei sui pattini, sei tu ad allontanarti. Una forza è sempre un aspetto di un'*interazione* fra due corpi, e ogni interazione si manifesta con due forze, una su ciascun corpo. Indicata con $\boldsymbol{F}_{\text{AB}}$ la forza esercitata **dal corpo A sul corpo B**, il **terzo principio della dinamica**, o principio di azione e reazione, afferma: se A esercita una forza su B, allora B esercita su A una forza uguale in modulo e direzione e opposta nel verso,

$$\boldsymbol{F}_{\text{AB}} = -\boldsymbol{F}_{\text{BA}}$$

Le due forze formano una **coppia di azione e reazione**. Newton scrive: «*Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi*», «a ogni azione è sempre contraria e uguale una reazione; ovvero, le azioni reciproche di due corpi sono sempre uguali e dirette in versi opposti»; e subito un esempio: «se qualcuno preme una pietra con un dito, anche il suo dito è premuto dalla pietra» (traduzione della redazione). Le due forze di una coppia:

- **agiscono su corpi diversi**, e per questo **non si annullano mai**: si sommano solo forze applicate allo stesso corpo;
- **sono della stessa natura**: se una è gravitazionale, lo è anche l'altra;
- **esistono insieme** e sono uguali sempre, anche quando i corpi accelerano.

13.5.2 Il libro sul tavolo, di nuovo

Nel capitolo 6 abbiamo detto che la forza normale $\boldsymbol{N}$ su un libro fermo è uguale e opposta al peso $\boldsymbol{P}$ *perché il libro è in equilibrio*. Peso e forza normale **non** sono una coppia di azione e reazione: agiscono entrambe sul libro e sono di natura diversa. Le coppie sono due (Figura 13.4): il peso, forza della Terra sul libro, e la forza con cui il libro attira la Terra; la forza normale, forza del tavolo sul libro, e la forza con cui il libro preme sul tavolo.

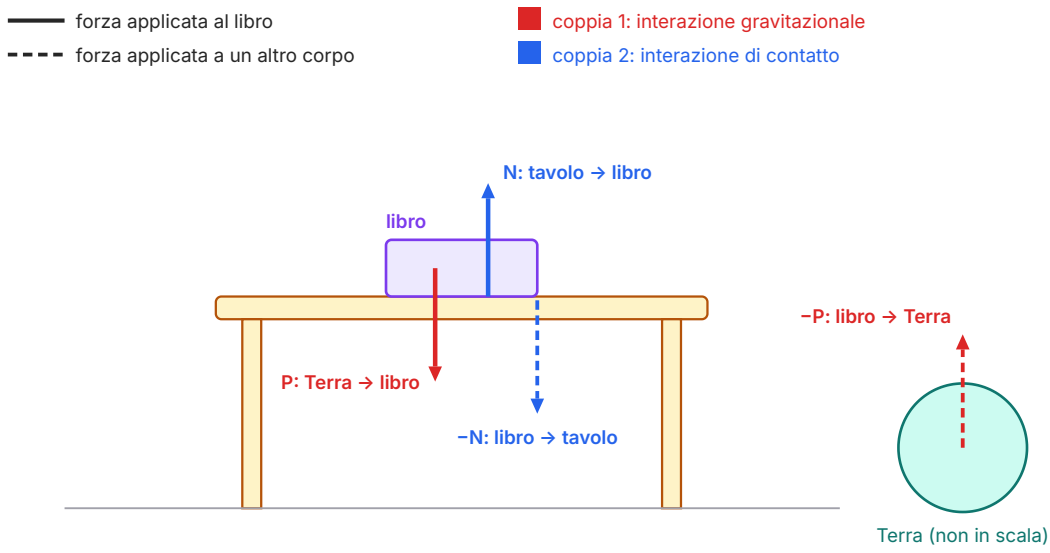


Figura 13.4 Le due coppie di azione e reazione per un libro fermo su un tavolo. In rosso l'interazione fra il libro e la Terra, in blu quella fra il libro e il tavolo. Le frecce continue sono le forze applicate al libro (peso e forza normale: uguali e opposte perché il libro è in equilibrio, non per il terzo principio); le tratteggiate sono le loro reazioni, applicate alla Terra e al tavolo. La Terra non è in scala.

Lo si capisce premendo il libro dall'alto con la mano: la forza normale cresce e supera il peso. Le forze di una coppia, invece, restano uguali in qualsiasi situazione.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Il libro sta fermo perché peso e reazione del tavolo sono azione e reazione.»** No: sta fermo perché la risultante delle forze *su di lui* è nulla (primo principio), e che peso e normale siano uguali ne è una conseguenza. Le loro reazioni agiscono sulla Terra e sul tavolo e non entrano nel diagramma di corpo libero del libro. Regola pratica: due forze applicate allo stesso corpo non sono mai una coppia di azione e reazione.

13.5.3 Camminare, remare, volare

Per camminare spingiamo il terreno all'indietro con il piede, grazie all'attrito statico; il terreno spinge il piede in avanti con una forza uguale e opposta, ed è questa che ci accelera. Su una lastra di ghiaccio liscio non riusciamo a partire perché non riusciamo a spingere il terreno. Il rematore spinge l'acqua all'indietro con il remo e l'acqua spinge avanti la barca; il nuotatore fa lo stesso con le braccia. Un razzo spinge all'indietro i gas della combustione e i gas spingono avanti il razzo: non ha bisogno di aria su cui appoggiarsi, e infatti funziona nel vuoto.

Le forze sono uguali, non gli effetti. Due pattinatori fermi, Luca di 70 kg e Sara di 50 kg, si spingono con le mani con una forza media di 140 N per 0,50 s. Luca accelera di 140 N/70 kg = 2,0 m/s^2, Sara di 140 N/50 kg = 2,8 m/s^2; dopo la spinta si allontanano a 1,0 m/s e 1,4 m/s in versi opposti: le accelerazioni stanno nel rapporto inverso delle masse. Così il sasso che cade attira la Terra con la stessa forza con cui è attratto, ma la Terra, di massa circa 6×10^{24} kg, accelera in modo impercettibile.

13.5.4 Il paradosso del cavallo e del carro

Un cavallo tira un carro e il carro tira il cavallo all'indietro con una forza uguale e opposta: come fanno a muoversi? Newton stesso, commentando la terza legge, osserva che «se un cavallo tira una pietra legata a una fune, anche il cavallo sarà tirato indietro, per così dire, ugualmente verso la pietra» (traduzione della redazione). L'errore è sommare forze applicate a corpi diversi. Sul carro agiscono la trazione del cavallo, in avanti, e l'attrito del terreno, all'indietro: se la trazione prevale, il carro accelera. Sul cavallo agiscono la trazione del carro, all'indietro, e la spinta del terreno sugli zoccoli, in avanti: se questa prevale, il cavallo accelera, e il carro con lui.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: l'accelerazione è proporzionale alla forza?

Materiali. Carrello su binario livellato (o rotaia a cuscino d'aria), carrucola leggera, filo sottile, piattello portapesi e cinque masse da 10 g, metro a nastro, cronometro al centesimo di secondo (o sensore di moto), bilancia.

Procedimento. 1) Livella il binario finché il carrello, spinto appena, prosegue a velocità costante. 2) Il filo collega il carrello al piattello, appeso oltre la carrucola: il sistema che accelera è formato da carrello, masse e piattello, e la forza che lo muove è il peso della parte appesa, $F = m_{app}\, g$. 3) Metti quattro masse sul carrello e una sul piattello, lascia partire il carrello da fermo e misura tre volte il tempo t per percorrere 0,800 m. 4) Sposta una massa dal carrello al piattello e ripeti, fino ad averle appese tutte: la forza cambia, ma **la massa totale del sistema resta la stessa**. 5) Da $s = \frac{1}{2}\, a\, t^2$ ricava $a = 2s/t^2$.

Tabella 13.2 Dati di un gruppo: massa totale del sistema (0,520 ± 0,001) kg; tratto s = (0,800 ± 0,001) m percorso partendo da fermo; tempo medio di tre misure con la semidispersione; $a = 2s/t^2$, con incertezza propagata; $F = m_{app}g$.

m_{app} (g)	F (N)	t (s)	a (m/s²)
10	0,098	3,08 ± 0,03	0,169 ± 0,003
20	0,196	2,11 ± 0,03	0,359 ± 0,011
30	0,294	1,72 ± 0,01	0,541 ± 0,007
40	0,392	1,47 ± 0,01	0,740 ± 0,011
50	0,490	1,33 ± 0,02	0,90 ± 0,03

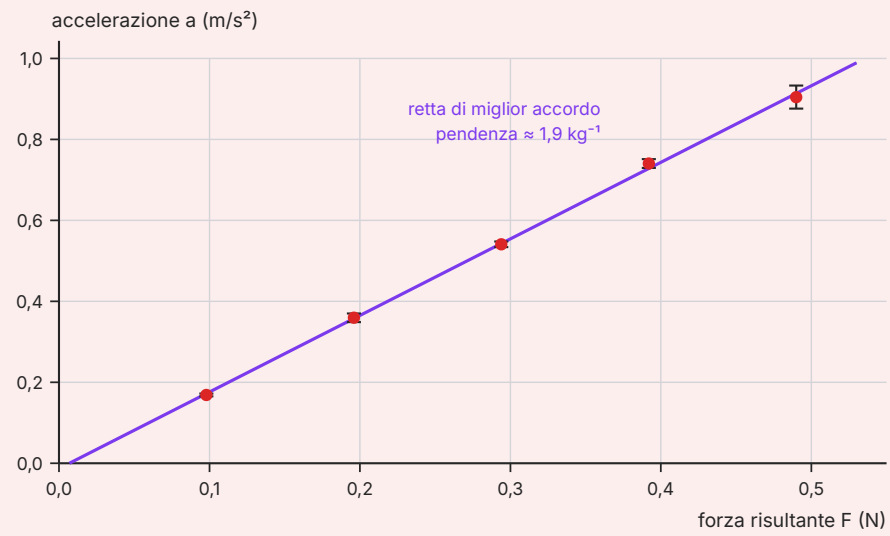


Figura 13.5 Accelerazione in funzione della forza per i dati della Tabella 13.2, con le barre d'incertezza e la retta di miglior accordo. La retta ha pendenza di circa 1,9 kg^{-1} e incontra l'asse delle forze poco a destra dell'origine, a circa 0,007 N.

Che cosa concludere. I punti della Figura 13.5 stanno, entro le incertezze, su una retta: a cresce linearmente con F. La pendenza è circa 1,9 kg^{-1}, e il suo inverso, $m \approx 0{,}53$ kg, è la massa del sistema secondo il secondo principio; le rette di massima e minima pendenza danno circa 0,51–0,56 kg, un intervallo che contiene il valore della bilancia, 0,520 kg: i risultati sono compatibili. La retta incontra l'asse delle forze a circa 0,007 N: è l'attrito residuo di ruote e carrucola, un piccolo errore sistematico da sottrarre a F.

Sicurezza. Metti un fermo imbottito in fondo al binario e un contenitore morbido sotto il piattello.

Per la relazione. Segui lo schema del capitolo 4: tabella con unità e incertezze, grafico a–F con barre d'incertezza e rette di miglior accordo, di massima e di minima pendenza, massa del sistema con la sua incertezza e confronto con la bilancia (compatibilità), errori sistematici (attrito, filo non parallelo al binario, avvio e arresto del cronometro).

IN SINTESI

Le leggi del capitolo

Primo principio: $\boldsymbol{R} = 0 \iff \boldsymbol{v}$ costante: con risultante nulla un corpo resta fermo o in moto rettilineo uniforme; vale nei sistemi inerziali.

Trasformazioni di Galileo: $x' = x - V\,t$, $t' = t$, $v' = v - V$ (m/s), $a' = a$: le velocità dipendono dal sistema inerziale, le accelerazioni no.

Secondo principio: $\boldsymbol{F} = m\,\boldsymbol{a}$: la forza risultante (N) è la massa inerziale (kg) per l'accelerazione (m/s^2), che ha la direzione e il verso della risultante. 1 N = 1 kg·m/s^2. Peso: $\boldsymbol{P} = m\,\boldsymbol{g}$, con $g \approx 9{,}8$ m/s^2 = 9,8 N/kg.

Terzo principio: $\boldsymbol{F}_{AB} = -\boldsymbol{F}_{BA}$: le due forze di un'interazione sono uguali e opposte, agiscono su corpi diversi e non si annullano.

SINTESI

- La dinamica studia il moto in relazione alle forze; poggia sui tre principi enunciati da Newton nei *Principia* (1687).
- Per Aristotele ogni moto violento richiede un motore a contatto, e il proiettile è spinto dall'aria; Filopono e Buridano attribuirono il moto del proiettile a una forza impressa nel corpo, l'impetus.
- Galileo capì che l'attrito nasconde l'inerzia: senza attriti, una palla su una superficie né in salita né in discesa si muoverebbe per sempre.
- Primo principio: se la risultante è nulla, un corpo resta in quiete o in moto rettilineo uniforme, e viceversa. La forza serve a cambiare la velocità, non a mantenerla; l'equilibrio comprende anche il moto rettilineo uniforme.
- I sistemi di riferimento in cui vale il primo principio sono inerziali: il suolo lo è con buona approssimazione, un veicolo che frena o curva no.
- Principio di relatività galileiana: le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali, e nessun esperimento di meccanica rivela il moto rettilineo uniforme del proprio sistema (la nave di Galileo).
- Trasformazioni di Galileo: $x' = x - V\,t$, $v' = v - V$; tutti gli osservatori inerziali misurano la stessa accelerazione.
- Secondo principio: $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$, con $\boldsymbol{F}$ forza risultante; l'accelerazione ha la direzione della risultante, non necessariamente della velocità.
- La massa inerziale misura l'inerzia; 1 N = 1 kg·m/s^2. Il peso $P = m\,g$ è il secondo principio con $a = g$; massa inerziale e gravitazionale risultano uguali.
- Terzo principio: $\boldsymbol{F}_{AB} = -\boldsymbol{F}_{BA}$; le forze di una coppia agiscono su corpi diversi, sono della stessa natura e non si annullano. Peso e forza normale non sono una coppia.
- Camminare, remare, nuotare e la propulsione dei razzi si spiegano con il terzo principio: si spinge qualcosa all'indietro per essere spinti in avanti.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Secondo Aristotele (*Fisica* VIII 10), una pietra lanciata continua a muoversi dopo aver lasciato la mano perché:

   A. la mano le ha impresso un impetus che resta nella pietra
   B. l'aria messa in moto dal lanciatore continua a spingerla
   C. nessuna forza agisce su di lei nel verso del moto
   D. il suo peso la spinge in avanti

2. ● Un'auto percorre un rettilineo a 90 km/h costanti. La forza risultante che agisce su di essa è:
   A. diretta in avanti, perché l'auto si muove in avanti
   B. diretta all'indietro, per la resistenza dell'aria
   C. uguale alla spinta del motore
   D. nulla

3. ● Quale dei seguenti sistemi di riferimento **non** è inerziale?
   A. un treno che viaggia in rettilineo a velocità costante
   B. il pavimento dell'aula
   C. un autobus che sta frenando
   D. una nave che naviga in linea retta a velocità costante su un mare calmo

4. ● Il newton, espresso con le unità fondamentali del SI, è:
   A. $kg \cdot m/s^2$
   B. $kg \cdot m/s$
   C. $kg/m \cdot s^2$
   D. $kg \cdot s^2/m$

5. ●● Su un corpo la forza risultante raddoppia mentre, a parità di tutto il resto, la massa si dimezza. L'accelerazione:
   A. resta la stessa
   B. raddoppia
   C. diventa quattro volte maggiore
   D. si dimezza

6. ● Le due forze di una coppia di azione e reazione:
   A. agiscono su due corpi diversi
   B. agiscono sullo stesso corpo e si annullano
   C. hanno sempre natura diversa
   D. esistono solo se i corpi sono fermi

7. ●● Nella cabina della nave di Galileo, che naviga in linea retta a velocità costante, una goccia si stacca dal soffitto. Rispetto alla cabina, la goccia cade:
   A. verso poppa, perché la nave le scorre sotto
   B. verso prua, perché la nave la trascina
   C. tanto più spostata verso poppa quanto più la nave è veloce
   D. in verticale, come a nave ferma

8. ●● Un pallone lanciato verticalmente verso l'alto si trova nel punto più alto della traiettoria. Trascurando l'aria, la forza risultante su di esso è:

   A. nulla, perché il pallone è fermo
   B. uguale al suo peso, diretta verso il basso
   C. uguale al suo peso, diretta verso l'alto
   D. la forza del lancio, che si sta esaurendo

Vero o falso

9. ● Se la forza risultante su un corpo è nulla, il corpo è necessariamente fermo. V / F

10. ● La massa inerziale di un astronauta è la stessa sulla Terra e sulla Luna. V / F

11. ●● Il peso di un libro appoggiato su un tavolo e la forza normale del tavolo sul libro formano una coppia di azione e reazione. V / F

12. ●● Due osservatori inerziali misurano per lo stesso corpo velocità diverse, ma la stessa accelerazione. V / F

13. ●● La velocità di un corpo ha sempre la stessa direzione e lo stesso verso della forza risultante che agisce su di esso. V / F

Applicare

14. ● Su un corpo di massa 8,0 kg agisce una forza risultante di 24 N. Calcola la sua accelerazione.

15. ● Quale forza risultante serve per imprimere a un'auto di 1500 kg un'accelerazione di 2,0 m/s^2?

16. ● Una forza risultante di 15 N imprime a un carrello un'accelerazione di 0,60 m/s^2. Qual è la massa del carrello?

17. ● Completa: «Un corpo su cui la forza risultante è nulla resta in quiete o si muove di moto _____ . I sistemi di riferimento in cui vale questa legge si dicono _____ . La massa che compare nel secondo principio, e che misura la resistenza di un corpo a cambiare velocità, si chiama massa _____ .»

18. ●● Un treno viaggia a 25 m/s rispetto ai binari. Un passeggero cammina verso la coda del treno a 1,2 m/s rispetto al vagone; un bambino fa rotolare una pallina verso la testa del treno a 3,0 m/s rispetto al vagone. Calcola le velocità del passeggero e della pallina rispetto ai binari.

19. ●● Usa la retta di miglior accordo della Figura 13.5 per stimare a) l'accelerazione del sistema quando la forza vale 0,25 N; b) la forza che produce un'accelerazione di 0,60 m/s^2.

20. ●● Due pattinatori fermi sul ghiaccio, Pietro (75 kg) e Irene (50 kg), si spingono a vicenda. Durante la spinta Irene acquista un'accelerazione di 3,0 m/s^2. Calcola l'intensità della forza con cui Pietro spinge Irene e l'accelerazione di Pietro.

Problemi

21. ●● Un carrello della spesa di 18 kg, fermo, viene spinto con una forza orizzontale costante di 27 N; le resistenze (attriti delle ruote) valgono complessivamente 9,0 N. Disegna il diagramma di corpo libero e calcola a) l'accelerazione del carrello; b) la velocità dopo 3,0 s; c) la strada percorsa in quei 3,0 s.

22. ●● Un'auto di 1200 kg viaggia a 72 km/h su una strada orizzontale; il conducente frena e l'auto si ferma in 40 m, con decelerazione costante. Calcola l'accelerazione dell'auto e la forza risultante che la frena (problema inverso; ripassa il capitolo 11).

23. ●●● Una cassa di 40 kg, ferma su un pavimento orizzontale, viene spinta con una forza orizzontale di 160 N; il coefficiente di attrito dinamico fra cassa e pavimento è $\mu_d = 0{,}25$ (capitolo 6). a) Calcola la forza d'attrito e l'accelerazione della cassa. b) Dopo 4,0 s la spinta cessa: quale velocità ha la cassa in quell'istante? c) Quanta strada percorre ancora prima di fermarsi?

24. ●●● Su un treno che viaggia in rettilineo a 20 m/s costanti, un passeggero lascia cadere una moneta da un'altezza di 1,6 m sopra il pavimento. a) Quanto tempo impiega la moneta a toccare il pavimento? b) Dove cade, rispetto al punto del pavimento che stava sotto la mano? c) Di quanto si è spostata la moneta, in orizzontale, rispetto ai binari? d) Con quale velocità, rispetto ai binari, tocca il pavimento? (Trascura l'aria; ripassa i capitoli 11 e 12.)

25. ●●● Marco, in piedi su uno skateboard (massa complessiva 60 kg), e un carrello di 40 kg sono fermi su un pavimento liscio, a 6,0 m di distanza, collegati da una fune. Marco tira la fune con una forza costante di 30 N. Trascurando gli attriti, calcola a) le accelerazioni di Marco e del carrello; b) dopo quanto tempo si incontrano; c) quanta strada ha percorso ciascuno. d) Dove si sarebbero incontrati se Marco avesse tirato con 60 N?

Ragionare e argomentare

26. ●●● Newton, commentando la terza legge nei *Principia*, scrive: «se un cavallo tira una pietra legata a una fune, anche il cavallo sarà tirato indietro, per così dire, ugualmente verso la pietra» (traduzione della redazione). Un compagno ne deduce: «allora le due forze si annullano, e né il cavallo né la pietra possono mettersi in moto». Spiega dove sta l'errore, indicando quali forze agiscono sul cavallo e quali sulla pietra.

27. ●●● Aristotele, nella *Fisica* (IV 8, 215a19–22), per dimostrare che il vuoto non esiste, scrive: «nessuno saprebbe dire perché un corpo messo in moto [nel vuoto] dovrebbe fermarsi in un luogo: perché qui piuttosto che là? Sicché o resterà fermo, o necessariamente si muoverà all'infinito, se qualcosa di più forte non lo ostacola» (traduzione della redazione). Che cosa afferma il passo? Che rapporto ha con il primo principio della dinamica? Perché Aristotele ne trae la conclusione opposta a quella di Galileo e Newton? Come si potrebbe oggi verificare che cosa accade a un corpo in moto quando gli attriti sono quasi assenti?

28. ●● Trova l'errore. Sull'autobus che frena bruscamente, Giulia dice: «Una forza mi ha spinto in avanti». Descrivi la situazione dal punto di vista di un passante fermo sul marciapiede: quali forze agiscono su Giulia, e perché il suo corpo si inclina in avanti?

PER APPROFONDIRE

- [NEW] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: le «Definizioni» e gli «Assiomi, ovvero leggi del moto» con cui si apre l'opera, con gli esempi che Newton stesso dà per ciascuna legge.
- [DIA] G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Giornata seconda: la palla sulla superficie «né erta né china» e la nave, letti per intero.
- [ARI] Aristotele, *Fisica*, libri IV (il vuoto e il moto dei proiettili), VII e VIII (ogni moto ha un motore).
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: il primo capitolo racconta, come un romanzo giallo, il passaggio dalle idee di Aristotele al principio d'inerzia.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sulle leggi di Newton.

Glossario del capitolo

Antiperistasi
Spiegazione antica del moto dei proiettili, discussa da Aristotele: l'aria spostata davanti al corpo gli girerebbe intorno e lo spingerebbe da dietro.

Coppia di azione e reazione
Le due forze, uguali in modulo e direzione e opposte nel verso, che due corpi esercitano l'uno sull'altro in un'interazione; agiscono su corpi diversi e non si annullano.

Dinamica
Parte della meccanica che studia il moto dei corpi in relazione alle forze che lo modificano; dal greco δύναμις.

Impetus
Nella fisica medievale (Buridano, XIV secolo), qualità impressa al corpo da chi lo lancia, che lo manterrebbe in moto finché la resistenza del mezzo non la consuma.

Inerzia
Proprietà dei corpi di conservare il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme; la sua misura è la massa inerziale.

Massa gravitazionale
Massa che misura quanto un corpo è attratto dalla Terra; è quella che si confronta con la bilancia a bracci uguali.

Massa inerziale
Massa che compare nel secondo principio della dinamica e che misura la resistenza di un corpo a cambiare la propria velocità; risulta uguale alla massa gravitazionale.

Primo principio della dinamica
Legge secondo cui un corpo su cui la forza risultante è nulla resta in quiete o in moto rettilineo uniforme, e viceversa; detto anche principio d'inerzia.

Principio di relatività galileiana
Le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali: nessun esperimento di meccanica rivela il moto rettilineo uniforme del proprio sistema.

Problema diretto della dinamica
Problema in cui, note le forze, si ricava l'accelerazione e quindi il moto; nel problema inverso si misura il moto e se ne deduce la forza risultante.

Secondo principio della dinamica
Legge secondo cui la forza risultante su un corpo è uguale al prodotto della sua massa per la sua accelerazione: $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$; l'accelerazione ha la direzione e il verso della risultante.

Sistema di riferimento inerziale
Sistema di riferimento in cui vale il principio d'inerzia; ogni sistema in moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema inerziale è inerziale.

Terzo principio della dinamica
Legge secondo cui, se un corpo A esercita una forza su un corpo B, B esercita su A una forza uguale e opposta: $\boldsymbol{F}_{AB} = -\boldsymbol{F}_{BA}$; detto anche principio di azione e reazione.

Trasformazioni di Galileo
Relazioni fra le misure di due sistemi inerziali in moto relativo con velocità V lungo l'asse x: $x' = x - Vt$, $t' = t$; ne segue $v' = v - V$.

Soluzioni

1. B. Per Aristotele il motore del proiettile è il mezzo: l'aria messa in moto dal lanciatore riceve la capacità di muovere e spinge la pietra. A descrive la teoria dell'impetus (Filopono, Buridano); C è il principio d'inerzia.

2. D. Velocità costante in modulo, direzione e verso: per il primo principio la risultante è nulla. La spinta in avanti (C) equilibra esattamente le resistenze (B).

3. C. Nell'autobus che frena gli oggetti si mettono in moto senza forze orizzontali: il primo principio non vale. Gli altri sono inerziali (con buona approssimazione), perché fermi o in moto rettilineo uniforme rispetto al suolo.

4. A. Dal secondo principio: $1\ \text{N} = 1\ \text{kg} \times 1\ \text{m/s}^2 = 1\ \text{kg·m/s}^2$.

5. C. $a = F/m$: con $2F$ e $m/2$ si ha $a' = 2F/(m/2) = 4F/m = 4a$.

6. A. Le forze di una coppia agiscono su corpi diversi, per questo non si annullano; sono della stessa natura ed esistono anche quando i corpi accelerano.

7. D. La goccia possiede già la velocità orizzontale della nave e la conserva per inerzia: nel sistema della nave, inerziale, cade in verticale (principio di relatività galileiana).

8. B. Dopo il lancio, trascurando l'aria, l'unica forza è il peso, verso il basso, anche nel punto più alto: lì $v = 0$ ma $a = g$. La «forza del lancio» non esiste dopo il distacco dalla mano.

9. F. Una risultante nulla implica velocità costante: il corpo può essere fermo oppure in moto rettilineo uniforme.

10. V. La massa inerziale è una proprietà del corpo e non dipende dal luogo; sulla Luna cambia il peso, $m\,g$, perché cambia g.

11. F. Agiscono sullo stesso corpo (il libro) e hanno natura diversa; sono uguali e opposte perché il libro è in equilibrio. Le reazioni sono applicate alla Terra e al tavolo.

12. V. Da $v' = v - V$ con V costante segue $\Delta v' = \Delta v$, quindi $a' = a$.

13. F. È l'accelerazione ad avere la direzione e il verso della risultante; la velocità può avere qualsiasi direzione (pallone che sale: v verso l'alto, F verso il basso).

14. $a = F/m = 24\ \text{N}/8{,}0\ \text{kg} = 3{,}0\ \text{m/s}^2$.

15. $F = m\,a = 1500\ \text{kg} \times 2{,}0\ \text{m/s}^2 = 3{,}0 \times 10^3\ \text{N}$.

16. $m = F/a = 15\ \text{N}/0{,}60\ \text{m/s}^2 = 25\ \text{kg}$.

17. rettilineo uniforme; inerziali; inerziale.

18. Con l'asse nel verso del treno, $v = v' + V$. Passeggero: $v = -1{,}2\ \text{m/s} + 25\ \text{m/s} = 23{,}8\ \text{m/s} \approx 24\ \text{m/s}$, nel verso del treno. Pallina: $v = 3{,}0\ \text{m/s} + 25\ \text{m/s} = 28{,}0\ \text{m/s} \approx 28\ \text{m/s}$.

19. Dal grafico (retta $a \approx 1{,}9\ \text{kg}^{-1} \times (F - 0{,}007\ \text{N})$): a) con $F = 0{,}25\ \text{N}$, $a \approx 0{,}46\ \text{m/s}^2$ (lettura accettabile 0,45–0,48 m/s^2); b) con $a = 0{,}60\ \text{m/s}^2$, $F \approx 0{,}32\ \text{N}$ (accettabile 0,31–0,33 N).

20. Sulla coppia agiscono forze uguali e opposte (terzo principio). $F = m_\text{I}\,a_\text{I} = 50\ \text{kg} \times 3{,}0\ \text{m/s}^2 = 1{,}5 \times 10^2\ \text{N}$; Pietro riceve da Irene la stessa forza: $a_\text{P} = 150\ \text{N}/75\ \text{kg} = 2{,}0\ \text{m/s}^2$, in verso opposto.

21. Sul carrello agiscono: peso e forza normale (verticali, si equilibrano), spinta di 27 N in avanti, resistenze di 9,0 N all'indietro. a) $a = (27\ \text{N} - 9{,}0\ \text{N})/18\ \text{kg} = 1{,}0\ \text{m/s}^2$. b) $v = a\,t = 1{,}0\ \text{m/s}^2 \times 3{,}0\ \text{s} = 3{,}0\ \text{m/s}$. c) $s = \tfrac{1}{2}\,a\,t^2 = \tfrac{1}{2} \times 1{,}0\ \text{m/s}^2 \times (3{,}0\ \text{s})^2 = 4{,}5\ \text{m}$.

22. Sull'auto agiscono peso e forza normale (si equilibrano) e la forza frenante dell'attrito sulla strada, all'indietro. $v_0 = 72\ \text{km/h} = 20\ \text{m/s}$; da $v^2 = v_0^2 + 2a\Delta s$ con $v = 0$: $a = -v_0^2/(2\Delta s) = -(20\ \text{m/s})^2/(80\ \text{m}) = -5{,}0\ \text{m/s}^2$. Forza risultante: $F = m|a| = 1200\ \text{kg} \times 5{,}0\ \text{m/s}^2 = 6{,}0 \times 10^3\ \text{N}$, opposta al moto.

23. Sulla cassa agiscono: peso $m\,g$ = 392 N e forza normale N = 392 N (si equilibrano, nessun'altra forza verticale), spinta di 160 N in avanti, attrito dinamico all'indietro. a) $F_d = \mu_d\,N$ = 0,25 × 40 kg × 9,8 m/s² = 98 N; a = (160 N − 98 N)/40 kg = 1,55 m/s² ≈ 1,6 m/s². b) $v = a\,t$ = 1,55 m/s² × 4,0 s = 6,2 m/s. c) Senza spinta resta solo l'attrito: $|a'| = F_d/m$ = 98 N/40 kg = 2,45 m/s²; $\Delta s = v^2/(2|a'|)$ = (6,2 m/s)²/(2 × 2,45 m/s²) ≈ 7,8 m.

24. Sulla moneta, dopo il distacco, agisce solo il peso. a) Il treno è un sistema inerziale: nel treno la moneta cade da ferma, $t = \sqrt{(2h/g)}$ = $\sqrt{(2 \times 1{,}6\text{ m}/9{,}8\text{ m/s}^2)}$ ≈ 0,57 s. b) Esattamente sotto la mano (sul punto del pavimento che stava sotto di essa): moneta e treno hanno la stessa velocità orizzontale. c) Rispetto ai binari la moneta conserva i 20 m/s orizzontali: x = 20 m/s × 0,571 s ≈ 11,4 m. d) Componente verticale $v_y = g\,t$ ≈ 5,6 m/s, orizzontale 20 m/s: v = $\sqrt{((20\text{ m/s})^2 + (5{,}6\text{ m/s})^2)}$ ≈ 21 m/s.

25. Su Marco agisce la tensione della fune, 30 N verso il carrello; sul carrello agisce la tensione, 30 N verso Marco (fune ideale; le forze verticali si equilibrano). a) a_M = 30 N/60 kg = 0,50 m/s²; a_C = 30 N/40 kg = 0,75 m/s². b) Si avvicinano con accelerazione relativa 1,25 m/s²: ½ $(a_M + a_C)\,t^2$ = 6,0 m, $t = \sqrt{(2 \times 6{,}0\text{ m}/1{,}25\text{ m/s}^2)}$ = $\sqrt{9{,}6}$ s ≈ 3,1 s. c) s_M = ½ × 0,50 m/s² × 9,6 s² = 2,4 m; s_C = ½ × 0,75 m/s² × 9,6 s² = 3,6 m (somma 6,0 m). d) Nello stesso punto: le accelerazioni raddoppiano entrambe, ma il loro rapporto, e quindi il rapporto fra gli spazi (3 : 2, inverso delle masse), non cambia; cambia solo il tempo, che diventa circa 2,2 s.

26. Traccia. L'errore è sommare forze applicate a corpi diversi: la forza del cavallo sulla pietra agisce sulla pietra, quella della pietra sul cavallo agisce sul cavallo, e non si annullano. Sulla pietra agiscono la trazione della fune (in avanti) e l'attrito del terreno (all'indietro), oltre a peso e normale: se la trazione supera l'attrito, la pietra accelera. Sul cavallo agiscono la trazione della fune (all'indietro) e la spinta del terreno sugli zoccoli (in avanti, reazione della spinta che il cavallo dà al terreno): se questa supera la trazione, il cavallo accelera. Newton, del resto, aggiunge che la fune tesa ostacola il progresso dell'uno quanto promuove quello dell'altro: proprio perché le forze sono applicate a corpi diversi.

27. Traccia. Il passo afferma che nel vuoto non ci sarebbe alcuna ragione perché un corpo in moto si fermi in un punto piuttosto che in un altro: o resterebbe fermo o si muoverebbe all'infinito. È, in sostanza, il principio d'inerzia. Aristotele però lo usa come una dimostrazione per assurdo: per lui un moto senza fine è impossibile e ogni moto richiede un motore, quindi conclude che il vuoto non può esistere. Galileo e Newton accettano invece la conseguenza come vera, perché capiscono che sono gli attriti, non una legge di natura, a fermare i corpi. Verifica: un disco su un tavolo a cuscino d'aria, o un carrello su una rotaia a cuscino d'aria orizzontale, ripresi con un video: la velocità resta quasi costante, tanto più quanto più si riducono gli attriti; le sonde spaziali, con i motori spenti, viaggiano per anni.

28. Traccia. Nel sistema del marciapiede (inerziale) nessuna forza spinge Giulia in avanti. Su Giulia agiscono il peso, la forza normale del pavimento e l'attrito del pavimento sui piedi, diretto all'indietro (verso opposto al moto dell'autobus). Il busto, su cui non agisce alcuna forza orizzontale, continua per inerzia a muoversi in avanti con la velocità di prima; i piedi invece vengono frenati dall'attrito insieme all'autobus. Per questo il corpo si inclina in avanti. La «forza in avanti» è solo l'impressione di chi descrive la scena dal sistema non inerziale dell'autobus (capitolo 14).