CAPITOLO

4

Il primo principio della dinamica

Un corpo non ha bisogno di una forza per muoversi: ne ha bisogno per cambiare il suo moto.

OBIETTIVI

1. Distinguere la descrizione del moto (cinematica) dallo studio delle sue cause (dinamica), e riconoscere lo stato di moto di un corpo nella sua velocità vettoriale.
2. Confrontare la concezione del moto di Aristotele con l'esperimento ideale dei piani inclinati di Galileo, e spiegare il ruolo dell'attrito.
3. Enunciare e applicare il primo principio della dinamica, riconoscendo che un corpo in moto rettilineo uniforme è in equilibrio.
4. Verificare con misure e grafici, entro le incertezze, se un moto è uniforme e quindi se la risultante delle forze è nulla.
5. Spiegare l'inerzia e il ruolo della massa come sua misura, con esempi quotidiani e di sicurezza stradale.
6. Definire un sistema di riferimento inerziale e descrivere dal suolo i moti osservati su un veicolo che frena o curva.

INDICE DEL CAPITOLO

4.1 Dalla cinematica alla dinamica 2
4.2 Da Aristotele a Galileo 3
4.3 Il primo principio della dinamica 5
4.4 Inerzia e massa 11
4.5 I sistemi di riferimento inerziali 13

Fisica 2 · Parte II · I principi della dinamica · versione 1.0
Capitolo 4: Il primo principio della dinamica · pagine 99–120 del volume completo · estratto per lo studio

Spingi un carrello della spesa e lascialo andare: dopo qualche metro si ferma. Calcia un pallone sull'erba: rotola, rallenta e si ferma. Sembra una regola senza eccezioni: per tenere in moto un corpo bisogna continuare a spingerlo, e quando la spinta finisce il moto si spegne. Per quasi duemila anni è stata questa l'idea di moto di filosofi e studiosi, ed è ancora oggi l'idea istintiva di quasi tutti noi.

In questo capitolo vedremo perché questa idea è sbagliata, e quanto è stato difficile accorgersene. Nella prima parte del libro abbiamo descritto i moti nel piano senza chiederci che cosa li causa: era *cinematica*. Ora comincia la **dinamica**, e la prima scoperta è sorprendente: una forza non serve a mantenere un corpo in moto, ma a **cambiare** il suo moto. Un corpo lasciato a sé stesso non si ferma: continua a muoversi in linea retta con velocità costante. È il **primo principio della dinamica**, il punto di partenza di tutta la meccanica di Newton.

4.1 Dalla cinematica alla dinamica

4.1.1 Che cosa sappiamo già delle forze

Nel primo volume hai incontrato le forze come cause di deformazione e le hai misurate con il dinamometro, una molla tarata in newton (*Fisica 1*, capitolo 7); hai imparato che le forze sono vettori e che più forze applicate a un corpo si sommano nella forza risultante $\boldsymbol{R} = \Sigma\boldsymbol{F}$. Hai studiato poi la condizione di equilibrio di un punto materiale (*Fisica 1*, capitolo 9): un corpo fermo resta fermo se, e solo se, la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla, $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$, cioè $R_x = 0$ e $R_y = 0$. Peso, reazione normale, tensione, attrito (*Fisica 1*, capitolo 8) e il diagramma di corpo libero restano i nostri strumenti.

Tutto questo, però, riguardava corpi **fermi**. Nella prima parte di questo volume, al contrario, abbiamo studiato corpi in moto, ma senza mai nominare le forze: abbiamo descritto *come* si muovono un proiettile o un'auto in una rotatoria, non *perché* si muovono così. È arrivato il momento di unire le due cose.

4.1.2 La domanda della dinamica

Si chiama **dinamica** la parte della meccanica che studia il legame fra le forze che agiscono su un corpo e il suo moto. La domanda fondamentale si può formulare così: **che cosa fa cambiare il moto di un corpo?**

Per rispondere conviene precisare che cosa intendiamo per «moto» di un corpo in un certo istante. Nei capitoli precedenti abbiamo visto che la velocità $\boldsymbol{v}$ è un vettore: ha un modulo (la velocità scalare), una direzione e un verso. Chiamiamo **stato di moto** di un corpo la sua velocità vettoriale: un corpo fermo è nello stato di moto con $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{0}$; un'auto che viaggia a 90 km/h verso

nord su un rettilineo è in un altro stato di moto. Lo stato di moto **cambia** quando cambia il vettore $\boldsymbol{v}$: quando il corpo accelera, frena o curva. Nel capitolo 1 abbiamo dato un nome a questo cambiamento: è l'accelerazione.

La domanda della dinamica diventa allora più precisa: **serve una forza per mantenere un corpo nel suo stato di moto, o serve una forza per cambiarlo?** La prima è la risposta di Aristotele, la seconda quella di Galileo e di Newton.

4.2 Da Aristotele a Galileo

4.2.1 Il moto secondo Aristotele

Aristotele (IV secolo a.C.) distingueva due tipi di moto. Il **moto naturale** è quello con cui ogni corpo tende a raggiungere il suo «luogo naturale»: i corpi pesanti, come un sasso, cadono verso il basso; quelli leggeri, come il fumo o il fuoco, salgono. Il **moto violento** è ogni altro moto, imposto dall'esterno: il carro tirato dai buoi, la freccia scoccata dall'arco, la pietra lanciata. Secondo Aristotele un moto violento dura solo finché qualcosa continua a spingere il corpo; quando la causa cessa, il moto cessa.

L'esperienza quotidiana sembra confermarlo: il carro si ferma quando i buoi si fermano. La teoria aveva però un punto debole, che i suoi stessi sostenitori conoscevano bene: il moto dei proiettili. Una freccia, una volta lasciata la corda dell'arco, continua a volare anche se nessuno la spinge. Aristotele attribuiva all'aria il compito di spingerla, una soluzione che nei secoli successivi fu discussa e criticata a lungo.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> «Se un corpo si muove, su di esso deve agire una forza nel verso del moto»: **falso**. È l'idea di Aristotele, ed è anche la più diffusa fra chi comincia a studiare fisica. Un disco da hockey che scivola sul ghiaccio dopo il colpo di bastone non è spinto in avanti da nulla: il bastone non lo tocca più. Sul disco agiscono il peso, la reazione normale del ghiaccio e un piccolo attrito, che è rivolto **all'indietro**. Il disco continua a muoversi perché si stava già muovendo, non perché qualcosa lo spinge; e rallenta, lentamente, proprio a causa dell'attrito.
>
> Quando studi un corpo in moto, quindi, non disegnare mai nel diagramma di corpo libero una «forza del moto»: disegna solo le forze esercitate da altri corpi (la Terra, il piano, una fune, l'aria) e chiediti, per ciascuna, quale corpo la esercita.

4.2.2 L'esperimento ideale dei due piani inclinati

Galileo Galilei attaccò il problema da un'altra parte: invece di chiedersi che cosa mantiene un corpo in moto, si chiese che cosa lo **ferma**. Il suo ragionamento, sviluppato nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632) e nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638), è un **esperimento ideale** (o esperimento mentale): un esperimento che non si

può realizzare esattamente, perché richiede condizioni perfette, ma che si può immaginare partendo da esperimenti reali e spingendoli al limite.

Immaginiamo due piani inclinati affacciati, raccordati in basso (Figura 4.1). Lasciamo scendere una pallina dalla sommità del primo, da un'altezza h. Arrivata in fondo, la pallina risale lungo il secondo piano, rallenta e si ferma; poi torna indietro. Con superfici molto lisce e una pallina dura e ben levigata si osserva che la pallina risale **quasi** fino all'altezza da cui è partita, e che la differenza è tanto più piccola quanto più si riducono gli attriti. Galileo ne concluse che, senza alcun attrito, la pallina risalirebbe **esattamente** alla stessa altezza h.

Ora diminuiamo l'inclinazione del secondo piano. Per tornare alla stessa altezza la pallina deve percorrere un tratto sempre più lungo: se il piano è inclinato di 30° le basta un tratto lungo il doppio di h, se è inclinato di 10° le serve un tratto lungo quasi sei volte h. Mentre il piano si abbassa, la pallina rallenta sempre più lentamente e si muove per un tempo sempre più lungo. E se il secondo piano diventa **orizzontale**? Allora la pallina non potrà mai tornare all'altezza iniziale, e non avrà alcun motivo per rallentare né per fermarsi: continuerà a muoversi sul piano orizzontale per sempre, con velocità costante.

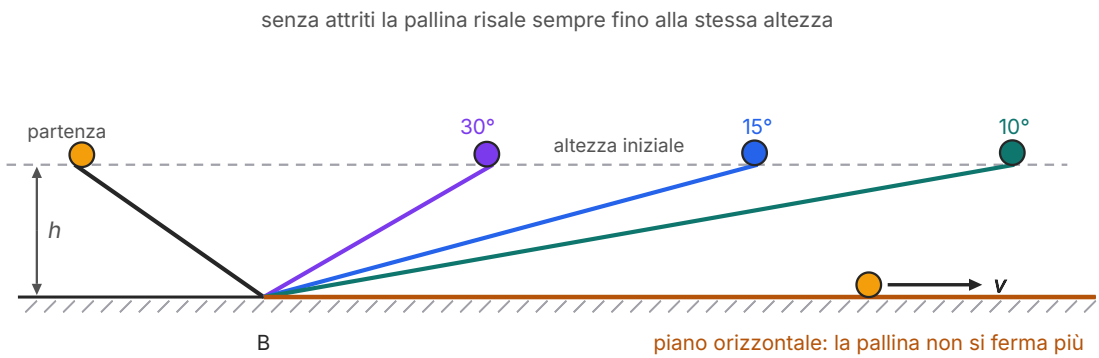


Figura 4.1 L'esperimento ideale dei due piani inclinati di Galileo (in assenza di attriti). La pallina parte da ferma da un'altezza h e, qualunque sia l'inclinazione del secondo piano, risale fino alla stessa altezza (tratteggiata): sul piano a 30° percorre un tratto lungo $2h$, su quello a 10° un tratto lungo circa $5{,}8h$ (le lunghezze sono $h/\text{sen}\,\alpha$, in scala). Se il secondo piano è orizzontale la pallina non raggiunge mai quell'altezza e continua a muoversi con velocità costante.

Il moto rettilineo uniforme su un piano orizzontale, quindi, non ha bisogno di una causa che lo mantenga: è lo stato in cui un corpo resta da solo, se niente interviene a cambiarlo. Ciò che ferma i corpi nella vita quotidiana non è l'assenza di una spinta, ma la presenza di forze che si oppongono al moto: l'attrito con il piano e la resistenza dell'aria.

4.2.3 L'attrito nasconde l'inerzia

Perché allora l'idea di Aristotele sembra così naturale? Perché sulla Terra l'attrito è quasi sempre presente, e quasi sempre importante. Possiamo però ridurlo, e vedere che cosa succede.

Diamo la stessa spinta a un disco su superfici sempre più lisce: un pavimento ruvido, un pavimento liscio, una lastra di ghiaccio. Con la stessa velocità iniziale il disco si ferma dopo un tempo sempre più lungo e dopo un tratto sempre più lungo (Figura 4.2): sul ghiaccio, dove l'attrito è molto piccolo, scivola per decine di metri prima di fermarsi. Ogni volta che l'attrito diminuisce, il moto si avvicina a un moto rettilineo uniforme.

In laboratorio si può fare ancora meglio. Su una **rotaia a cuscino d'aria** un carrello scorre su un sottile strato d'aria soffiato da tanti piccoli fori lungo la rotaia: il carrello non tocca la rotaia, e l'attrito si riduce moltissimo. Basta un colpetto perché il carrello percorra tutta la rotaia, rimbalzi in fondo e torni indietro quasi alla stessa velocità. Il tavolo da air hockey funziona allo stesso modo. Il caso ideale del primo principio, senza attrito, è il limite a cui queste esperienze si avvicinano sempre più.

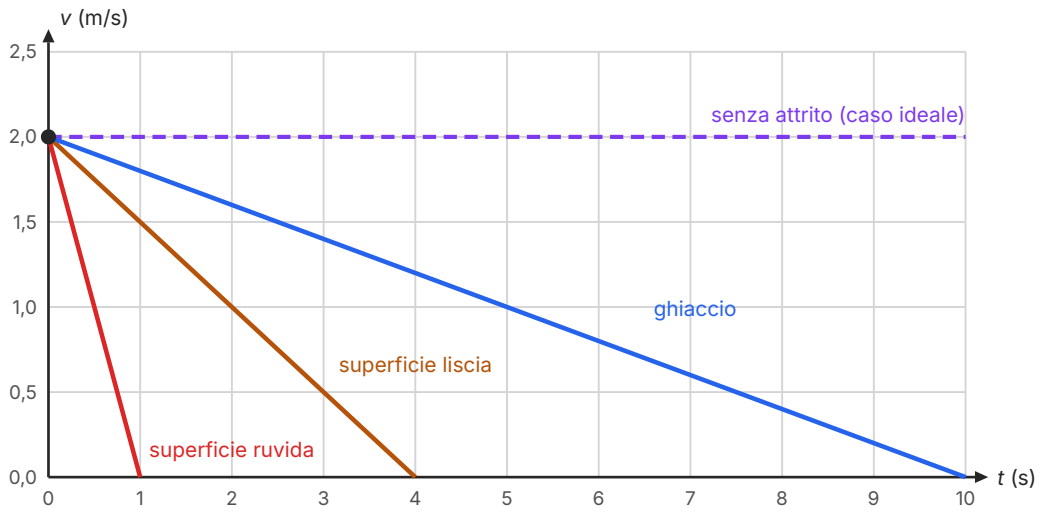


Figura 4.2 Grafico velocità-tempo di un disco lanciato a 2,0 m/s su superfici diverse (dati tipici, con decelerazioni costanti di 2,0 m/s^2, 0,50 m/s^2 e 0,20 m/s^2). Il disco si ferma dopo 1,0 s, 4,0 s e 10 s. Riducendo l'attrito il grafico si avvicina alla retta orizzontale del caso ideale: un moto rettilineo uniforme che non finisce mai.

4.3 Il primo principio della dinamica

4.3.1 L'enunciato

Isaac Newton raccolse l'idea di Galileo e la pose a fondamento della meccanica nei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), come la prima delle tre leggi del moto che oggi chiamiamo **principi della dinamica**, o leggi di Newton. In forma moderna, il **primo principio della dinamica**, detto anche **principio d'inerzia**, si enuncia così:

un corpo resta in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme se la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla: $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0} \Rightarrow \boldsymbol{v}$ costante

Il principio vale in entrambi i sensi. Se la risultante è nulla, la velocità non cambia: un corpo fermo resta fermo, un corpo in moto continua a muoversi in linea retta con la stessa velocità scalare. Viceversa, se osserviamo che la velocità di un corpo è costante (in modulo, direzione e verso), possiamo concludere che la risultante delle forze su di esso è nulla:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0} \;\Leftrightarrow\; \boldsymbol{v} = \text{costante (quiete o moto rettilineo uniforme)}$$

Se invece la risultante non è nulla, lo stato di moto cambia: il corpo accelera, rallenta o curva. Di **quanto** cambia, a parità di forza, lo dirà il secondo principio, nel prossimo capitolo; il primo principio ci dice soltanto **quando** il moto non cambia. Nota che la condizione riguarda la **risultante**: su un corpo possono agire molte forze, anche intense, purché la loro somma vettoriale sia nulla.

APPROFONDIMENTO

La prima legge nelle parole di Newton

I *Principia* sono scritti in latino. Nella prima edizione (1687), all'inizio della parte intitolata *Axiomata, sive leges motus* (Assiomi, ovvero leggi del moto), la prima legge dice: «*Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.*» Cioè: ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto uniforme in linea retta, se non in quanto è costretto a mutare quello stato da forze impresse.

Newton aggiunge subito un esempio: «*Projectilia perseverant in motibus suis nisi quatenus a resistentia aeris retardantur & vi gravitatis impelluntur deorsum.*» (I proiettili perseverano nei loro moti, se non in quanto sono rallentati dalla resistenza dell'aria e spinti verso il basso dalla forza di gravità.) È esattamente ciò che abbiamo visto nel capitolo 2: in orizzontale, senza aria, la velocità di un proiettile resta costante; in verticale cambia, perché agisce il peso.

4.3.2 Il moto rettilineo uniforme è un equilibrio

Nel primo volume (*Fisica 1*, capitolo 9) si anticipava una curiosità: le condizioni dell'equilibrio statico valgono anche per un corpo che si muove in linea retta a velocità costante. Ora il primo principio la trasforma in una legge. La condizione $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$ non distingue fra un corpo fermo e un corpo in moto rettilineo uniforme: in entrambi i casi le forze si compensano. Un'auto a 90 km/h costanti su un rettilineo o un ascensore che sale a velocità costante sono in equilibrio, come un libro fermo sul tavolo. Per i corpi in moto rettilineo uniforme si parla a volte di equilibrio dinamico, per distinguerlo dall'equilibrio statico dei corpi fermi.

Tutti i metodi del primo volume per l'equilibrio del punto materiale (diagramma di corpo libero, scomposizione delle forze lungo due assi, le equazioni $R_x = 0$ e $R_y = 0$) si applicano quindi

senza modifiche ai corpi che si muovono di moto rettilineo uniforme. Due esempi sono nella Figura 4.3. Una cassa trascinata sul pavimento a velocità costante non è soggetta a una forza netta in avanti: la tensione della fune compensa esattamente l'attrito dinamico, rivolto all'indietro. Un paracadutista che scende a velocità costante è soggetto a due forze uguali e opposte, il peso e la forza dell'aria: la forza dell'aria non è «più debole» del peso, come verrebbe da pensare vedendolo scendere, ma esattamente uguale.

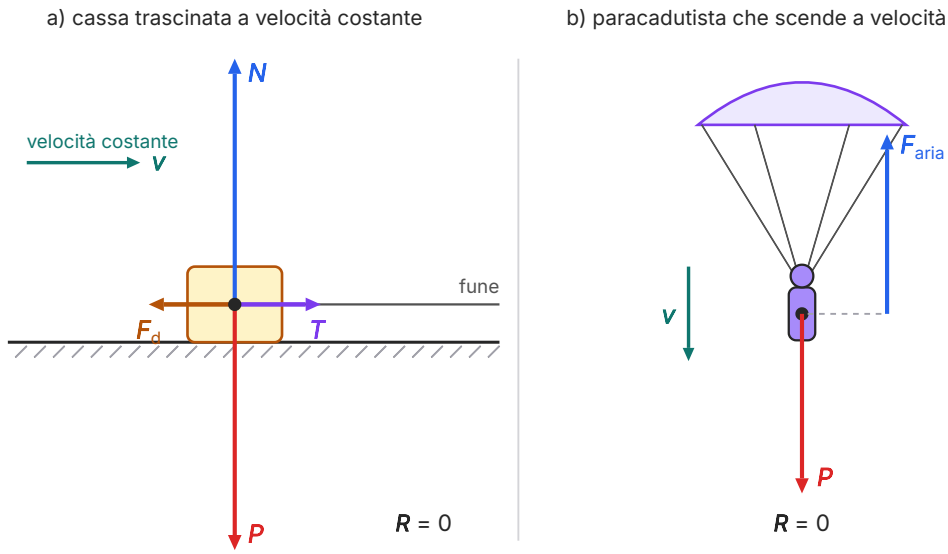


Figura 4.3 Due corpi in equilibrio pur essendo in moto. a) Diagramma di corpo libero di una cassa di 30 kg trascinata a velocità costante su un pavimento con $\mu_d = 0{,}35$, in scala: il peso $\boldsymbol{P}$ (294 N) è compensato dalla reazione normale $\boldsymbol{N}$, la tensione $\boldsymbol{T}$ (103 N) dall'attrito dinamico $\boldsymbol{F}_d$. b) Un paracadutista scende a velocità costante: la forza dell'aria $\boldsymbol{F}_{aria}$ (disegnata accanto alla sua retta d'azione, per chiarezza) è uguale e opposta al peso. In entrambi i casi la risultante è nulla; la velocità $\boldsymbol{v}$, in verde, non è una forza.

ERRORE FREQUENTE

Due errori speculari. Primo: «se $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$, il corpo è fermo». **Falso**: può anche muoversi di moto rettilineo uniforme, come la cassa e il paracadutista della Figura 4.3. Secondo: «se in un istante la velocità è zero, la risultante è zero». **Falso** anche questo. Un pallone lanciato verticalmente verso l'alto, nel punto più alto (*Fisica 1*, capitolo 16), è fermo per un istante, ma il peso continua ad agire: la risultante non è nulla, e infatti un attimo dopo il pallone sta già scendendo. Il primo principio collega la forza risultante al **cambiamento** della velocità, non al suo valore.

ESEMPIO SVOLTO

Trascinare una cassa a velocità costante

Problema. Una cassa di massa 30 kg viene trascinata sul pavimento orizzontale con una fune, a velocità costante. Il coefficiente di attrito dinamico fra cassa e pavimento è $\mu_d = 0{,}35$. Calcola la tensione della fune a) se la fune è orizzontale; b) se la fune è inclinata di 30° sopra l'orizzontale.

Soluzione. La velocità è costante, quindi per il primo principio $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$. Sulla cassa agiscono il peso $\boldsymbol{P}$, verso il basso; la reazione normale $\boldsymbol{N}$ del pavimento, verso l'alto; la tensione $\boldsymbol{T}$ della fune; l'attrito dinamico $\boldsymbol{F}_d$, opposto al moto. Asse x orizzontale nel verso del moto, asse y verticale verso l'alto.

a) Il peso vale $P = mg = 30\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 294\ \text{N}$. Lungo y: $N - P = 0$, quindi $N = 294$ N; la forza preme sul pavimento ha lo stesso valore, $F_\perp = 294$ N. L'attrito dinamico vale $F_d = \mu_d F_\perp = 0{,}35 \times 294\ \text{N} \approx 103$ N. Lungo x: $T - F_d = 0$, quindi $T \approx 1{,}0 \times 10^2$ N.

b) Ora la tensione ha due componenti: $T \cos 30°$ in orizzontale e $T \operatorname{sen} 30°$ verso l'alto. La componente verticale solleva in parte la cassa, e la reazione normale diminuisce. Lungo y: $N + T \operatorname{sen} 30° - P = 0$, cioè $N = P - T \operatorname{sen} 30°$. Lungo x: $T \cos 30° - \mu_d N = 0$. Sostituendo la prima nella seconda:

$$T \cos 30° = \mu_d (P - T \operatorname{sen} 30°) \;\Rightarrow\; T = \frac{\mu_d P}{\cos 30° + \mu_d \operatorname{sen} 30°}$$

$$T = \frac{0{,}35 \times 294\ \text{N}}{0{,}866 + 0{,}35 \times 0{,}500} \approx 99\ \text{N}$$

La reazione normale è $N = 294\ \text{N} - 98{,}8\ \text{N} \times 0{,}500 \approx 245$ N, e l'attrito si riduce a $0{,}35 \times 245\ \text{N} \approx 86$ N, uguale alla componente orizzontale della tensione, $98{,}8\ \text{N} \times 0{,}866 \approx 86$ N.

Controllo. Tirando verso l'alto si fatica un po' meno (99 N invece di 103 N), perché la fune alleggerisce la cassa e riduce l'attrito. Le unità sono corrette (N) e i valori sono una frazione del peso, come ci si aspetta per un coefficiente d'attrito minore di 1. La velocità non compare: l'attrito dinamico non dipende da essa.

4.3.3 Riconoscere un moto con risultante nulla

Il principio d'inerzia è anche uno strumento di misura: se troviamo sperimentalmente che un corpo si muove in linea retta con velocità costante, entro le incertezze di misura, possiamo affermare che le forze su di esso si compensano. Basta controllare, con i metodi di *Fisica 1*, capitolo 5, che il grafico spazio-tempo sia una retta.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il carrello che non rallenta

Materiali. Una rotaia a cuscino d'aria lunga circa 2 m, con il suo compressore, e un carrello con una bandierina; quattro **fotocellule** (traguardi ottici che registrano l'istante in cui la bandierina interrompe un fascio di luce) collegate a un cronometro elettronico (sensibilità 0,001 s); un metro a nastro (sensibilità 1 mm); una livella; un pezzetto di feltro e del nastro biadesivo.

Procedimento. 1) Con la livella, e controllando che il carrello posato fermo non si sposti da solo, rendi la rotaia perfettamente orizzontale. 2) Disponi le quattro fotocellule a distanze uguali, (0,400 ± 0,002) m l'una dall'altra. 3) Con il compressore acceso dai al carrello un colpetto e registra i tempi impiegati a percorrere i tre tratti; ripeti tre volte e calcola la media dei tempi di ciascun tratto (incertezza: la semidispersione, circa 0,003 s). 4) Ripeti la misura con il compressore acceso ma con il feltro incollato sotto il carrello, in modo che strisci leggermente sulla rotaia.

Tabella 4.1 Tempi medi per percorrere tratti successivi di 0,400 m e velocità medie nei tratti (dati tipici).

	Tratto 1	Tratto 2	Tratto 3
A · senza feltro: t (s)	0,842	0,846	0,844
A · v (m/s)	0,475 ± 0,004	0,473 ± 0,004	0,474 ± 0,004
B · con feltro: t (s)	0,597	0,659	0,745
B · v (m/s)	0,670 ± 0,007	0,607 ± 0,006	0,537 ± 0,005

Che cosa concludere. L'incertezza relativa di ciascuna velocità è la somma delle incertezze relative di spazio e tempo, per esempio 0,002/0,400 + 0,003/0,842 ≈ 0,9%. Nella prova A le tre velocità differiscono fra loro al massimo di 0,002 m/s, meno delle incertezze: il moto è uniforme e, per il primo principio, la risultante delle forze sul carrello è nulla. Nella prova B le velocità diminuiscono da un tratto all'altro molto più delle incertezze: il feltro introduce una forza d'attrito rivolta all'indietro, la risultante non è più nulla e il moto non è più uniforme.

Sicurezza. Non bloccare i fori della rotaia e non lasciare il carrello fermo sulla rotaia con il compressore spento e poi farlo strisciare: righeresti la superficie. Ferma il carrello a fine corsa con la mano, senza farlo urtare con forza contro i respingenti.

Per la relazione. Segui lo schema di *Fisica 1*, capitolo 5. Riporta le misure ripetute e la tabella dei tempi medi, calcola le velocità con le loro incertezze e rappresentale in un grafico velocità–numero del tratto, con le barre d'incertezza, per le due prove. Verifica la compatibilità delle tre velocità della prova A e discuti il risultato alla luce del primo principio. Discuti gli errori sistematici: una piccola inclinazione residua della rotaia (che farebbe accelerare o rallentare il carrello sempre nello stesso verso), il debole attrito con l'aria, la posizione delle fotocellule. Pro-

poni un modo per accorgerti se la rotaia è inclinata, per esempio lanciando il carrello nei due versi.

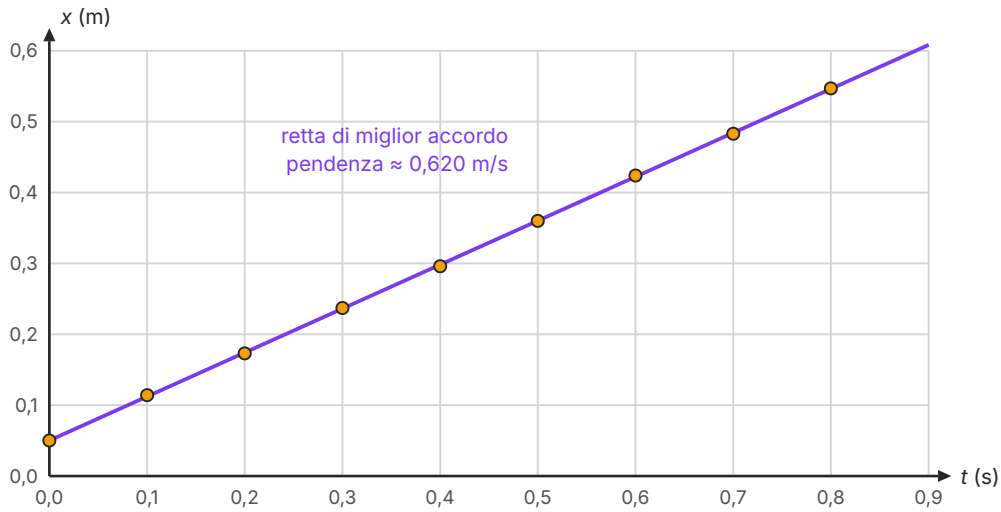


Figura 4.4 Grafico spazio-tempo del disco sul tavolo ad aria dell'esempio svolto (dati tipici, incertezza ± 0,003 m: le barre d'incertezza sono più piccole dei punti). I punti sono allineati su una retta: il moto è rettilineo uniforme, con velocità uguale alla pendenza, circa 0,62 m/s. Per il primo principio, la risultante delle forze sul disco è nulla.

ESEMPIO SVOLTO

Un disco sul tavolo ad aria

Problema. Un disco viene lanciato su un tavolo da air hockey e filmato dall'alto con uno smartphone, con un righello nell'inquadratura. Fermando il video ogni 0,10 s si leggono le posizioni del disco lungo la sua traiettoria rettilinea, con un'incertezza di ± 0,003 m (tabella e Figura 4.4). Il moto è uniforme? Che cosa si può dire delle forze che agiscono sul disco nel piano del tavolo?

Tabella 4.2 Posizioni del disco lette dal video (incertezza ± 0,003 m).

t (s)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
x (m)	0,050	0,114	0,173	0,237	0,296	0,360	0,424	0,483	0,547

Soluzione. Le velocità medie nei singoli intervalli di 0,10 s valgono, per esempio, (0,114 − 0,050) m / 0,10 s = 0,64 m/s e (0,173 − 0,114) m / 0,10 s = 0,59 m/s: oscillano fra 0,59 m/s e 0,64 m/s. Ma ogni differenza di posizioni ha un'incertezza di 0,003 m + 0,003 m = 0,006 m, cioè 0,06 m/s sulla velocità di un intervallo così breve: le oscillazioni sono dovute agli errori di lettura, non al moto.

Conviene allora usare tutti i dati insieme. Nel grafico x–t i punti sono allineati, entro le barre d'incertezza, su una retta; la pendenza della retta di miglior accordo è circa 0,620 m/s. Le rette di massima e minima pendenza compatibili con il primo e l'ultimo punto hanno pendenze (0,547 + 0,003 − 0,050 + 0,003) m / 0,80 s ≈ 0,629 m/s e (0,547 − 0,003 − 0,050 − 0,003) m / 0,80 s ≈ 0,614 m/s, quindi v = (0,621 ± 0,008) m/s.

Conclusione. Entro le incertezze di misura il disco si muove di moto rettilineo uniforme, quindi la risultante delle forze nel piano del tavolo è nulla: l'attrito con il cuscino d'aria e la resistenza dell'aria sono troppo piccoli per produrre un rallentamento misurabile in 0,8 s. In verticale il peso del disco è compensato dalla spinta dell'aria soffiata dal tavolo.

4.4 Inerzia e massa

4.4.1 L'inerzia, una proprietà di tutti i corpi

Il primo principio descrive una proprietà comune a tutti i corpi: la tendenza a conservare il proprio stato di moto. Si chiama **inerzia** la tendenza di un corpo a mantenere invariata la propria velocità, cioè a restare fermo se è fermo e a continuare a muoversi in linea retta con velocità costante se è in moto. Per questo il primo principio si chiama anche principio d'inerzia.

L'inerzia non è una forza: è una proprietà del corpo, che si manifesta quando una forza cerca di cambiarne il moto. La riconosci in molte situazioni quotidiane.

- Il **trucco della tovaglia**: se si sfila una tovaglia liscia con uno strappo rapidissimo, piatti e bicchieri restano quasi fermi sul tavolo. L'attrito della tovaglia agisce su di loro per un tempo troppo breve per metterli in moto in modo apprezzabile.
- Una **moneta su un cartoncino** appoggiato sopra un bicchiere: con un colpo secco del dito il cartoncino vola via e la moneta, rimasta quasi ferma, cade nel bicchiere.
- La **bottiglia di ketchup**: la si scuote verso il basso e la si ferma bruscamente; la bottiglia si arresta, la salsa al suo interno continua a muoversi verso l'imboccatura.

4.4.2 La massa misura l'inerzia

Non tutti i corpi hanno la stessa inerzia. Prova a spingere un carrello della spesa vuoto e poi lo stesso carrello pieno di bottiglie d'acqua: per metterlo in moto, per fermarlo e per fargli prendere una curva, il carrello pieno richiede uno sforzo molto maggiore. Un pallone da calcio e una palla da bowling, colpiti con la stessa forza, si mettono in moto in modo molto diverso. La grandezza che misura l'inerzia di un corpo è la sua massa, che hai imparato a misurare con la bilancia nel primo volume (*Fisica 1*, capitolo 2): **più grande è la massa di un corpo, più grande è la sua inerzia**, cioè più è difficile cambiarne la velocità. Il legame quantitativo fra massa, forza e cambiamento di velocità è il contenuto del secondo principio, che studieremo nel prossimo capitolo.

DA RICORDARE

Massa e peso sono grandezze diverse. La massa (in kg) misura l'inerzia di un corpo ed è la stessa ovunque: sulla Terra, sulla Luna o nello spazio. Il peso (in N) è la forza con cui la Terra, o un altro corpo celeste, attira il corpo, e cambia da un luogo all'altro. Nella lingua di tutti i giorni si dice «peso 60 kg», ma in fisica una persona di massa 60 kg ha, sulla Terra, un peso di circa 590 N.

A bordo della Stazione Spaziale Internazionale gli oggetti sembrano non pesare nulla e galleggiano nella cabina; eppure gli astronauti devono spingere con forza per mettere in moto una cassa di attrezzi pesante, e devono trattenerla per fermarla. In assenza di peso apparente l'inerzia rimane tutta: la massa non dipende da dove ci si trova.

COLLEGAMENTI

Cinture di sicurezza e poggiatesta

In un urto frontale un'auto si ferma in pochi decimi di secondo. I passeggeri, per inerzia, continuano a muoversi in avanti alla velocità che l'auto aveva prima dell'urto, finché qualcosa non li ferma: senza protezioni, quel «qualcosa» sono il volante, il cruscotto o il parabrezza. La **cintura di sicurezza** collega il corpo all'abitacolo e lo fa rallentare insieme all'auto, distribuendo la forza su torace e bacino, parti robuste del corpo; l'airbag completa la protezione della testa. Una cintura indossata male, troppo allentata o con la parte bassa sopra la pancia, lascia al corpo lo spazio per prendere velocità rispetto all'auto prima di essere trattenuto.

Nel tamponamento, cioè in un urto da dietro, accade il contrario: l'auto viene spinta in avanti di colpo, il sedile spinge in avanti il busto, ma la testa, per inerzia, resta indietro, e il collo si piega bruscamente all'indietro. È il meccanismo del **colpo di frusta**. Il **poggiatesta**, regolato con il bordo superiore all'altezza della sommità della testa e vicino alla nuca, spinge in avanti la testa insieme al busto e limita il movimento del collo.

4.5 I sistemi di riferimento inerziali

4.5.1 Il primo principio non vale per tutti gli osservatori

Nel primo volume (*Fisica 1*, capitolo 15) hai visto che il moto è relativo: lo stesso corpo può essere fermo per un osservatore e in moto per un altro. Allora anche il primo principio va riferito a un osservatore. Facciamo un esperimento su un autobus. Sul pavimento liscio dell'autobus fermo c'è una bottiglietta d'acqua, appoggiata in piedi; trascuriamo il suo attrito con il pavimento. L'autobus parte, viaggia su un rettilineo a velocità costante, poi frena.

Per un passeggero seduto, finché l'autobus sta fermo o viaggia a velocità costante la bottiglietta resta ferma accanto a lui, come prevede il primo principio: sulla bottiglietta agiscono solo il peso e la reazione del pavimento, che si compensano. Ma quando l'autobus frena, il passeggero vede la bottiglietta mettersi in moto in avanti e scivolare lungo il corridoio, anche se nessuno l'ha toccata e nessuna nuova forza orizzontale agisce su di essa. Per lui il primo principio è violato: la risultante è nulla, ma la bottiglietta accelera.

Per chi guarda dalla strada, invece, non c'è nulla di strano (Figura 4.5). Prima della frenata la bottiglietta si muoveva insieme all'autobus, alla sua stessa velocità. Durante la frenata l'autobus rallenta, perché sulle sue ruote agisce l'attrito della strada; sulla bottiglietta, invece, nessuna forza orizzontale agisce, e quindi, per inerzia, continua a muoversi con la stessa velocità di prima. È l'autobus che rallenta «sotto» la bottiglietta, non la bottiglietta che viene spinta in avanti.

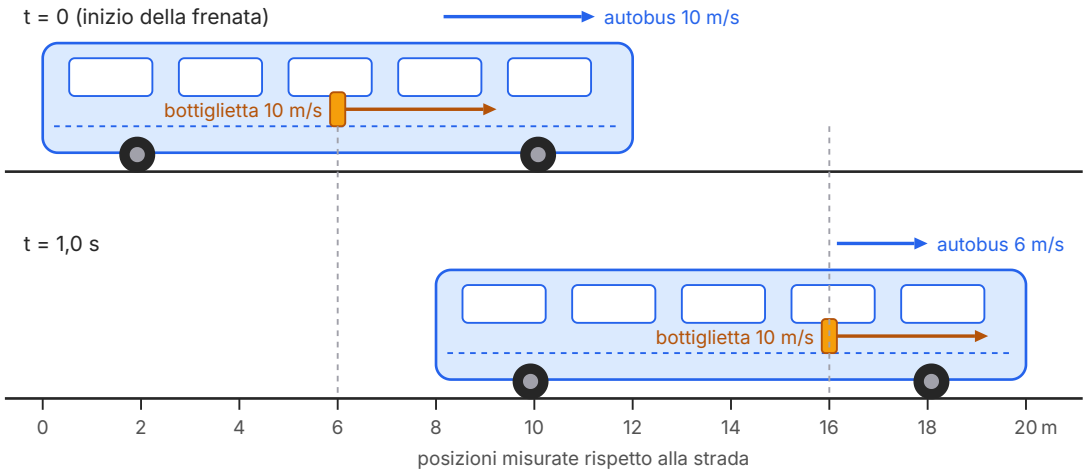


Figura 4.5 Un autobus che viaggia a 10 m/s frena con decelerazione costante di 4,0 m/s^2; una bottiglietta appoggiata sul pavimento (attrito trascurabile) non è soggetta a forze orizzontali. Osservata dalla strada, dopo 1,0 s la bottiglietta ha percorso 10 m, l'autobus solo 8,0 m: la bottiglietta si trova 2,0 m più avanti rispetto all'autobus. Le posizioni, in scala, sono misurate rispetto alla strada.

ESEMPIO SVOLTO

La bottiglietta nell'autobus che frena

Problema. Un autobus viaggia su un rettilineo a 36 km/h e frena con decelerazione costante di 4,0 m/s^2. Sul pavimento c'è una bottiglietta, il cui attrito con il pavimento è trascurabile. Calcola, per un osservatore fermo sulla strada, quanto si spostano l'autobus e la bottiglietta nel primo secondo di frenata, e di quanto si è spostata la bottiglietta rispetto all'autobus. (Usa le leggi del moto uniformemente accelerato, *Fisica 1*, capitolo 16.)

Soluzione. 36 km/h = 10 m/s. Dal punto di vista della strada, sulla bottiglietta non agiscono forze orizzontali: per il primo principio prosegue di moto rettilineo uniforme a 10 m/s. In 1,0 s percorre $s_b = 10\ \text{m/s} \times 1{,}0\ \text{s} = 10\ \text{m}$. L'autobus si muove di moto uniformemente decelerato: $s_a = v_0\,t - \tfrac{1}{2}\,a\,t^2 = 10\ \text{m/s} \times 1{,}0\ \text{s} - \tfrac{1}{2} \times 4{,}0\ \text{m/s}^2 \times (1{,}0\ \text{s})^2 = 8{,}0\ \text{m}$.

Rispetto all'autobus la bottiglietta si è spostata in avanti di 10 m − 8,0 m = 2,0 m. Nota che questo spostamento vale $\tfrac{1}{2}\,a\,t^2$: per il passeggero la bottiglietta si muove come se avesse un'accelerazione di 4,0 m/s^2 in avanti, uguale e opposta a quella dell'autobus, anche se nessuna forza la spinge.

Controllo. L'autobus si ferma dopo 10 m/s / 4,0 m/s^2 = 2,5 s; il nostro intervallo di 1,0 s cade durante la frenata, quindi la legge usata è valida. Il ragionamento corretto è quello dell'osservatore sulla strada, per il quale il primo principio vale.

4.5.2 Che cos'è un sistema di riferimento inerziale

L'esempio dell'autobus mostra che il primo principio vale per alcuni osservatori e non per altri. Diamo allora una definizione operativa: si chiama **sistema di riferimento inerziale** un sistema di riferimento in cui vale il primo principio della dinamica, cioè in cui un corpo su cui agisce una risultante nulla resta fermo o si muove di moto rettilineo uniforme. Un sistema di riferimento in cui il primo principio non vale si chiama **sistema di riferimento non inerziale**.

Per verificare se un sistema è inerziale, basta un oggetto su cui la risultante delle forze sia nulla, come la bottiglietta sul pavimento liscio o un pendolo fermo: se, in quel sistema, l'oggetto resta fermo o si muove di moto rettilineo uniforme, il sistema è inerziale. L'autobus fermo o in moto rettilineo uniforme rispetto alla strada lo è; l'autobus che frena, che accelera o che percorre una curva non lo è. In generale, un sistema che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema inerziale è anch'esso inerziale; un sistema che accelera rispetto a un sistema inerziale non lo è.

E la strada, cioè la superficie della Terra? La Terra ruota su sé stessa e gira intorno al Sole, quindi a rigore non è un sistema inerziale. Ma per gli esperimenti che si svolgono in pochi secondi e in pochi metri, come quelli di questo libro, gli effetti di questi moti sono piccolissimi: **il suolo è, con ottima approssimazione, un sistema di riferimento inerziale**. D'ora in poi descriveremo sempre i moti rispetto al suolo, o rispetto a sistemi che si muovono di moto rettilineo uniforme rispetto a esso. Allo stesso modo, in un'auto che svolta a sinistra un pacco sul sedile non è «spinto» a destra: tende a proseguire in linea retta mentre l'auto gli curva sotto. Nel capitolo 7 vedremo quale forza serve a far curvare un corpo.

APPROFONDIMENTO

Nei sistemi non inerziali: le forze apparenti

Questo approfondimento è facoltativo. Un passeggero dell'autobus che frena potrebbe voler descrivere i moti dal suo punto di vista, senza scendere a terra. Per «salvare» il primo principio dovrebbe immaginare che sulla bottiglietta agisca una forza in avanti, che però non è esercitata da nessun corpo: non c'è nulla che tocchi la bottiglietta, né un corpo che la attiri. Forze di questo tipo, introdotte solo per descrivere i moti in un sistema non inerziale, si chiamano **forze apparenti** (o fittizie). La spinta «verso l'esterno» che sentiamo in un'auto che curva è un esempio di forza apparente.

In questo libro non useremo mai le forze apparenti: descriveremo sempre i moti da un sistema inerziale, dove compaiono solo le forze vere, esercitate da un corpo su un altro. Negli anni successivi studierai come si passa da un sistema di riferimento a un altro e come si trattano i sistemi non inerziali.

IN SINTESI

Il primo principio in poche righe

$\boldsymbol{R} = \Sigma \boldsymbol{F}$ — la forza risultante è la somma vettoriale di tutte le forze che agiscono sul corpo; si misura in newton (N).

$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0} \Leftrightarrow \boldsymbol{v}$ costante — primo principio della dinamica (principio d'inerzia): in un sistema di riferimento inerziale, un corpo con risultante nulla resta in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme, e viceversa.

$R_x = 0$, $R_y = 0$ — le condizioni di equilibrio per componenti valgono anche per un corpo in moto rettilineo uniforme (equilibrio dinamico).

$F_d = \mu_d F_\perp$ — l'attrito dinamico (N) da compensare per trascinare un corpo a velocità costante su un piano; μ_d è un numero puro.

massa (kg) — misura l'inerzia di un corpo, cioè la sua resistenza ai cambiamenti di velocità; non va confusa con il peso (N).

Sistema di riferimento inerziale — quello in cui vale il primo principio; il suolo lo è con ottima approssimazione, un veicolo che accelera, frena o curva no.

Il primo principio dice che cosa accade quando la risultante è nulla. Nel prossimo capitolo affronteremo il caso opposto: che cosa fa una forza risultante diversa da zero, e di quanto cambia la velocità di un corpo a seconda della sua massa. È il secondo principio della dinamica.

SINTESI

- La dinamica studia il legame fra le forze che agiscono su un corpo e il suo moto; lo stato di moto di un corpo è la sua velocità vettoriale.
- Secondo Aristotele un moto «violento» dura solo finché una causa continua ad agire sul corpo; l'esperienza quotidiana sembra confermarlo, perché l'attrito ferma i corpi.
- Con l'esperimento ideale dei due piani inclinati Galileo concluse che, senza attriti, un corpo su un piano orizzontale continuerebbe a muoversi per sempre con velocità costante.
- Riducendo l'attrito (ghiaccio, tavolo ad aria, rotaia a cuscino d'aria) il moto di un corpo lanciato si avvicina sempre più a un moto rettilineo uniforme.
- Primo principio della dinamica (principio d'inerzia): un corpo resta in quiete o in moto rettilineo uniforme se, e solo se, la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla.
- Un corpo in moto rettilineo uniforme è in equilibrio: le condizioni $R_x = 0$ e $R_y = 0$ valgono anche per esso.
- Una forza non serve a mantenere il moto, ma a cambiarlo; per far procedere un corpo a velocità costante bisogna soltanto compensare le forze resistenti, come l'attrito.
- Velocità nulla non significa risultante nulla (il punto più alto di un lancio verticale), e risultante nulla non significa velocità nulla.
- L'inerzia è la tendenza di un corpo a conservare la propria velocità; la massa ne è la misura, ed è diversa dal peso.
- Cinture di sicurezza e poggiatesta proteggono dagli effetti dell'inerzia del corpo negli urti frontali e nei tamponamenti.
- Un sistema di riferimento è inerziale se in esso vale il primo principio; un veicolo che accelera, frena o curva non è un sistema inerziale.
- Il suolo è, con ottima approssimazione, un sistema di riferimento inerziale: da esso descriveremo sempre i moti, senza forze apparenti.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Secondo il primo principio della dinamica, un corpo su cui agisce una forza risultante nulla:
   A. sta necessariamente fermo
   B. resta fermo oppure si muove di moto rettilineo uniforme
   C. rallenta fino a fermarsi
   D. si muove di moto circolare uniforme

2. ● Secondo Aristotele, un corpo che si muove di moto «violento»:
   - **A.** si muove solo finché una causa continua ad agire su di esso
   - **B.** continua a muoversi per sempre con velocità costante
   - **C.** accelera sempre
   - **D.** si muove sempre verso il proprio luogo naturale

3. ● La massa di un corpo è una misura:
   - **A.** del suo peso
   - **B.** del suo volume
   - **C.** della sua velocità
   - **D.** della sua inerzia

4. ● Nell'esperimento ideale dei due piani inclinati, se il secondo piano diventa orizzontale e non ci sono attriti, la pallina:
   - **A.** si ferma appena arriva sul piano orizzontale
   - **B.** torna indietro sul primo piano
   - **C.** continua a muoversi con velocità costante
   - **D.** accelera senza limiti

5. ● Un'auto procede su un rettilineo a 90 km/h costanti. La risultante delle forze che agiscono su di essa:
   - **A.** è nulla
   - **B.** è diretta in avanti
   - **C.** è diretta all'indietro
   - **D.** è uguale al peso dell'auto

6. ● Un sistema di riferimento è inerziale se:
   - **A.** è fermo rispetto al Sole
   - **B.** in esso vale il primo principio della dinamica
   - **C.** ruota con velocità angolare costante
   - **D.** ha l'origine nel centro della Terra

7. ●● Un pallone lanciato verticalmente verso l'alto si trova nel punto più alto della traiettoria. In quell'istante (trascura l'aria):
   - **A.** velocità e forza risultante sono entrambe nulle
   - **B.** la velocità è nulla e la risultante è diretta verso l'alto
   - **C.** la velocità è nulla, ma sul pallone agisce ancora il peso
   - **D.** né la velocità né la risultante sono nulle

8. ●● Un autobus frena bruscamente e un passeggero in piedi, che non si tiene, cade in avanti. Per chi guarda dalla strada ciò accade perché:
   A. una forza spinge il passeggero in avanti
   B. durante la frenata il peso del passeggero aumenta
   C. il sedile davanti lo attira
   D. il passeggero tende a conservare la propria velocità mentre l'autobus rallenta

9. ● Un disco da hockey scivola sul ghiaccio e rallenta molto lentamente. Il rallentamento è dovuto:
   A. all'esaurirsi della spinta ricevuta dal bastone
   B. all'inerzia del disco
   C. al piccolo attrito del ghiaccio e alla resistenza dell'aria
   D. alla massa del disco

Vero o falso

10. ● Se su un corpo non agisce alcuna forza, il corpo è necessariamente fermo. V / F

11. ● Un corpo che si muove di moto rettilineo uniforme è in equilibrio: la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla. V / F

12. ●● Per far scorrere una cassa sul pavimento a velocità costante bisogna spingerla perché c'è l'attrito, non perché il moto abbia bisogno di una causa. V / F

13. ● A bordo della Stazione Spaziale Internazionale gli oggetti galleggiano nella cabina: quindi lì non hanno inerzia. V / F

14. ●● Un treno che percorre una curva con velocità scalare costante è un sistema di riferimento inerziale. V / F

Applicare

15. ● Un paracadutista, con il paracadute aperto, scende a velocità costante; la massa sua e dell'attrezzatura è 90 kg. Disegna il diagramma di corpo libero e calcola il modulo della forza esercitata dall'aria.

16. ● Un ascensore, di massa complessiva 600 kg con i passeggeri, sale a velocità costante appeso a un cavo. Trascurando gli attriti, quanto vale la tensione del cavo?

17. ● Completa. Il primo principio della dinamica afferma che un corpo resta in stato di _____ o di moto _____ se la _____ delle forze che agiscono su di esso è nulla. La grandezza che misura l'inerzia di un corpo è la sua _____ .

18. ● In quali di queste situazioni la risultante delle forze sul corpo è nulla? a) Un libro fermo sul tavolo. b) Un'auto che parte al semaforo verde. c) Uno sciatore che scende a velocità costante lungo un pendio rettilineo. d) Un'auto che percorre una rotatoria a 30 km/h costanti. e) Un ascensore che sta partendo verso l'alto.

19. ●● Una slitta di 12 kg è trascinata a velocità costante sulla neve orizzontale da una fune orizzontale, con una forza di 9,4 N. Calcola il coefficiente di attrito dinamico fra slitta e neve.

20. ●● Una cassa scende lungo uno scivolo inclinato di 20° con velocità costante. Scomponendo il peso lungo lo scivolo e perpendicolarmente a esso (*Fisica 1*, capitolo 9), calcola il coefficiente di attrito dinamico fra cassa e scivolo. Dipende dalla massa della cassa?

21. ●● Un carrello sulla rotaia a cuscino d'aria percorre un primo tratto di 0,600 m in 1,25 s e il tratto successivo, anch'esso di 0,600 m, in 1,26 s; l'incertezza sui tempi è ± 0,02 s e quella sulle lunghezze è trascurabile. Calcola le due velocità medie con la loro incertezza: il moto si può considerare uniforme?

22. ●● Leggi il grafico della Figura 4.2. a) Quanto tempo impiega il disco a fermarsi sulla superficie liscia? b) Calcola lo spazio percorso in quel tempo come area sotto il grafico. c) Quale tratto avrebbe percorso, nello stesso tempo, nel caso ideale senza attrito?

Problemi

23. ●●● Una cassa di 50 kg viene trascinata a velocità costante su un pavimento orizzontale con una fune inclinata di 25° sopra l'orizzontale; il coefficiente di attrito dinamico è 0,30. Disegna il diagramma di corpo libero e calcola la tensione della fune e la reazione normale del pavimento.

24. ●●● (con *Fisica 1*, capitolo 16) Un autobus lungo 12 m viaggia a 54 km/h e frena con decelerazione costante di 3,0 m/s^2. Uno zaino è appoggiato sul pavimento a 6,0 m dalla parete anteriore; il suo attrito con il pavimento è trascurabile. a) Di quanto si è spostato lo zaino rispetto all'autobus dopo 1,0 s? b) Dopo quanto tempo urta la parete anteriore? L'autobus è ancora in moto in quell'istante? c) Con quale velocità, rispetto all'autobus, lo zaino arriva contro la parete?

25. ●● Un aereo di linea di massa $7{,}0 \times 10^4$ kg vola in orizzontale a velocità e quota costanti; i motori forniscono una spinta complessiva di $4{,}0 \times 10^4$ N. Calcola la forza verticale (portanza) che l'aria esercita sulle ali e la resistenza dell'aria. Quanto vale il rapporto fra portanza e resistenza?

26. ●●● Un disco scivola su un pavimento e viene filmato; la tabella riporta le sue posizioni lungo una retta, con incertezza ± 0,003 m. a) Calcola la velocità media in ciascun intervallo. b) Il moto è uniforme? Che cosa puoi dire della risultante delle forze orizzontali sul disco e del suo verso? c) Stima la decelerazione del disco.
t (s): 0 · 0,20 · 0,40 · 0,60 · 0,80 · 1,00 x (m): 0 · 0,162 · 0,312 · 0,450 · 0,576 · 0,690

27. ●●● Un blocco di 8,0 kg viene tirato su per un piano inclinato di 30° da una forza parallela al piano, a velocità costante; il coefficiente di attrito dinamico è 0,25. a) Disegna il diagramma di corpo libero, ricordando il verso dell'attrito, e calcola la forza necessaria. b) Quale forza parallela al piano, e in quale verso, serve invece per far scendere il blocco a velocità costante?

28. ●● Una paracadutista di 75 kg (con l'attrezzatura), prima di aprire il paracadute, scende a una velocità costante di circa 55 m/s; dopo l'apertura, raggiunge una nuova velocità costante di circa 5,0 m/s. Calcola la forza dell'aria nelle due fasi a velocità costante. In quale delle due è maggiore? Commenta il risultato.

29. ●● Nell'esperimento ideale di Galileo una pallina parte da ferma da un'altezza di 0,40 m sul primo piano. Senza attriti, quanto è lungo il tratto che percorre sul secondo piano prima di fermarsi, se questo è inclinato di 20°, di 10° e di 5°? Che cosa succede se l'inclinazione si avvicina a 0°?

Ragionare e argomentare

30. ●● Trova l'errore. «Un pallone calciato rotola sul prato e poi si ferma: questo dimostra che un corpo si muove solo finché una forza lo spinge, come diceva Aristotele.» Spiega che cosa c'è di sbagliato e come il primo principio spiega l'osservazione.

31. ●●● Un trolley è appoggiato, libero, sul sedile posteriore di un'auto. Descrivi che cosa gli accade, dal punto di vista di un osservatore a terra, a) in una frenata brusca; b) in una curva a sinistra a velocità costante; c) in un tamponamento subito da dietro. In quali casi il passeggero seduto dietro vede il trolley muoversi «da solo»?

32. ●●● Sei chiuso in un vagone senza finestrini, con un pavimento molto liscio, che viaggia su un binario rettilineo. Progetta un esperimento con una pallina per capire se il treno sta accelerando, frenando o procede a velocità costante. Il tuo esperimento può distinguere fra un treno fermo e un treno in moto rettilineo uniforme? Perché?

PER APPROFONDIRE

- [NEW] Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: la sezione *Axiomata, sive leges motus*, con la prima legge e i suoi esempi.
- [DIA] Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*: nella giornata seconda il dialogo sulla palla che scende e sale lungo piani inclinati e sul suo moto su un piano orizzontale.
- [GAL] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*: nella giornata terza i ragionamenti sui piani inclinati e sul pendolo, all'origine del principio d'inerzia.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le prime pagine raccontano, quasi senza formule, come si arrivò al principio d'inerzia e perché fu così difficile.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: il capitolo sul primo principio, con molti esempi quotidiani di inerzia.

Glossario del capitolo

Cintura di sicurezza
Dispositivo che, in un urto, collega il corpo del passeggero all'abitacolo e lo fa rallentare insieme al veicolo.

Colpo di frusta
Brusca flessione del collo all'indietro e poi in avanti, tipica dei tamponamenti, dovuta all'inerzia della testa.

Dinamica
Parte della meccanica che studia il legame fra le forze che agiscono su un corpo e il suo moto.

Esperimento ideale
Esperimento immaginato in condizioni perfette (per esempio senza attriti), ottenuto spingendo al limite esperimenti reali; detto anche esperimento mentale.

Forza apparente
Forza non esercitata da alcun corpo, introdotta per descrivere i moti in un sistema di riferimento non inerziale; detta anche forza fittizia.

Fotocellula
Traguardo ottico che registra l'istante in cui un corpo interrompe un fascio di luce; collegata a un cronometro elettronico misura intervalli di tempo.

Inerzia
Tendenza di un corpo a conservare la propria velocità; la sua misura è la massa.

Moto naturale
Nella fisica di Aristotele, il moto con cui un corpo tende spontaneamente al proprio luogo naturale (i gravi verso il basso, i corpi leggeri verso l'alto).

Moto violento
Nella fisica di Aristotele, ogni moto imposto dall'esterno, che dura solo finché una causa continua ad agire sul corpo.

Poggiatesta
Appoggio dietro la testa che, in un tamponamento, spinge la testa in avanti insieme al busto e limita il colpo di frusta.

Primo principio della dinamica
Un corpo resta in quiete o in moto rettilineo uniforme se, e solo se, la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla; vale nei sistemi di riferimento inerziali.

Principi della dinamica
Le tre leggi del moto enunciate da Newton nei *Principia* (1687), dette anche leggi di Newton.

Principio d'inerzia
Altro nome del primo principio della dinamica.

Rotaia a cuscino d'aria
Rotaia forata da cui esce aria compressa: il carrello scorre su un sottile strato d'aria e l'attrito si riduce moltissimo.

Sistema di riferimento inerziale
Sistema di riferimento in cui vale il primo principio della dinamica; il suolo lo è con ottima approssimazione.

Sistema di riferimento non inerziale
Sistema di riferimento in cui il primo principio non vale, per esempio un veicolo che accelera, frena o curva.

Stato di moto
La velocità vettoriale di un corpo; cambia quando cambia il modulo, la direzione o il verso della velocità.

Soluzioni

1. B. Con $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$ la velocità non cambia: il corpo resta fermo se era fermo, prosegue di moto rettilineo uniforme se era in moto.

2. A. Per Aristotele un moto non naturale richiede una causa che agisca continuamente; quando la causa cessa, il moto cessa.

3. D. La massa misura l'inerzia, cioè la resistenza di un corpo ai cambiamenti della sua velocità; il peso è una forza.

4. C. Sul piano orizzontale la pallina non può mai tornare all'altezza iniziale e nulla la rallenta: prosegue con velocità costante.

5. A. Velocità costante in modulo e direzione ⇒ per il primo principio $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$: la forza motrice compensa le forze resistenti.

6. B. È la definizione operativa: un sistema è inerziale se in esso un corpo con risultante nulla resta fermo o si muove di moto rettilineo uniforme.

7. C. In quell'istante $v = 0$, ma sul pallone agisce il peso: la risultante non è nulla, e infatti la velocità continua a cambiare.

8. D. Dalla strada: i piedi vengono frenati dal pavimento, il resto del corpo, per inerzia, conserva la velocità che aveva; nessuna forza lo spinge in avanti.

9. C. Il disco non ha bisogno di una spinta per muoversi; rallenta perché l'attrito e la resistenza dell'aria, rivolti all'indietro, danno una risultante non nulla.

10. F. Senza forze (o con risultante nulla) il corpo può anche muoversi di moto rettilineo uniforme.

11. V. È il primo principio: velocità costante ⇔ $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$; si parla di equilibrio dinamico.

12. V. Senza attrito la cassa, una volta in moto, proseguirebbe da sola a velocità costante; la spinta serve solo a compensare l'attrito.

13. F. Gli oggetti sembrano senza peso, ma conservano la loro massa e quindi tutta la loro inerzia: per metterli in moto o fermarli serve una forza.

14. F. Un corpo libero, nel treno in curva, non resta fermo rispetto al treno (scivola verso l'esterno): il primo principio non vale, perché il treno cambia direzione, quindi accelera.

15. Sul paracadutista agiscono il peso, verso il basso, e la forza dell'aria, verso l'alto. Velocità costante ⇒ $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$ ⇒ $F_{\text{aria}} = mg = 90\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \approx 8{,}8 \times 10^2\ \text{N}$, verso l'alto.

16. Sull'ascensore agiscono il peso e la tensione del cavo. Velocità costante ⇒ $T = mg = 600\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \approx 5{,}9 \times 10^3\ \text{N}$.

17. quiete; rettilineo uniforme; risultante (somma vettoriale); massa.

18. a) e c). In a) il corpo è fermo, in c) si muove di moto rettilineo uniforme. In b) ed e) la velocità aumenta; in d) cambia direzione: in questi casi la risultante non è nulla.

19. Sulla slitta agiscono peso, reazione normale, tensione della fune e attrito dinamico. Velocità costante ⇒ lungo la verticale $N = mg = 12\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \approx 118\ \text{N}$; in orizzontale $F_d = T = 9{,}4\ \text{N}$. Quindi $\mu_d = F_d/N = 9{,}4\ \text{N} / 117{,}6\ \text{N} \approx 0{,}080$.

20. Sulla cassa agiscono il peso, la reazione normale e l'attrito dinamico (verso l'alto lungo lo scivolo). Velocità costante ⇒ $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{0}$. Lungo lo scivolo: $mg \operatorname{sen} 20° = \mu_d N$; perpendicolarmente: $N = mg \cos 20°$. Quindi $\mu_d = \operatorname{sen} 20°/\cos 20° = \tan 20° \approx 0{,}36$. Non dipende dalla massa, che si semplifica.

21. $v_1 = 0{,}600\ \text{m} / 1{,}25\ \text{s} = 0{,}480\ \text{m/s}$; $v_2 = 0{,}600\ \text{m} / 1{,}26\ \text{s} \approx 0{,}476\ \text{m/s}$. Incertezza relativa $\approx 0{,}02/1{,}25 \approx 1{,}6\%$, cioè $\pm 0{,}008$ m/s: $v_1 = (0{,}480 \pm 0{,}008)$ m/s, $v_2 = (0{,}476 \pm 0{,}008)$ m/s. La differenza (0,004 m/s) è minore della somma delle incertezze: le velocità sono compatibili e il moto si può considerare uniforme.

22. a) Dal grafico, sulla superficie liscia la velocità si annulla dopo 4,0 s. b) Area del triangolo: ½ × 2,0 m/s × 4,0 s = 4,0 m. c) Nel caso ideale, moto uniforme: 2,0 m/s × 4,0 s = 8,0 m, il doppio.

23. Sulla cassa agiscono peso (490 N), reazione normale N, tensione T inclinata di 25°, attrito dinamico all'indietro. Velocità costante ⇒ $\boldsymbol{R} = \mathbf{0}$. Lungo y: $N = mg - T \sin 25°$; lungo x: $T \cos 25° = 0{,}30\,N$. Sostituendo: $T = 0{,}30 \times 490\ \text{N} / (\cos 25° + 0{,}30 \sin 25°) = 147\ \text{N} / (0{,}906 + 0{,}127) \approx 1{,}4 \times 10^2$ N (142 N). $N = 490\ \text{N} - 142\ \text{N} \times 0{,}423 \approx 4{,}3 \times 10^2$ N (430 N). Controllo: 0,30 × 430 N ≈ 129 N = 142 N × cos 25°. ✓

24. 54 km/h = 15 m/s. Dalla strada: sullo zaino non agiscono forze orizzontali, quindi prosegue a 15 m/s (primo principio); l'autobus decelera. a) Zaino: 15 m; autobus: $15\ \text{m/s} \times 1{,}0\ \text{s} - \frac{1}{2} \times 3{,}0\ \text{m/s}^2 \times (1{,}0\ \text{s})^2 = 13{,}5$ m; spostamento relativo 1,5 m in avanti. b) Lo spostamento relativo è $\frac{1}{2}\,a\,t^2$: $\frac{1}{2} \times 3{,}0\ \text{m/s}^2 \times t^2 = 6{,}0$ m ⇒ $t^2 = 4{,}0\ \text{s}^2$, $t = 2{,}0$ s. L'autobus si ferma dopo 15 m/s / 3,0 m/s² = 5,0 s, quindi è ancora in moto (a 15 − 3,0 × 2,0 = 9,0 m/s). c) Velocità relativa: 15 m/s − 9,0 m/s = 6,0 m/s in avanti.

25. Sull'aereo agiscono peso, portanza (verso l'alto), spinta dei motori (in avanti) e resistenza dell'aria (all'indietro). Velocità costante ⇒ $\boldsymbol{R} = \mathbf{0}$. Verticale: portanza = $mg = 7{,}0 \times 10^4\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \approx 6{,}9 \times 10^5$ N. Orizzontale: resistenza = spinta = $4{,}0 \times 10^4$ N. Rapporto: $6{,}86 \times 10^5 / 4{,}0 \times 10^4 \approx 17$.

26. a) Velocità medie: 0,162/0,20 = 0,81 m/s; (0,312 − 0,162)/0,20 = 0,75 m/s; 0,69 m/s; 0,63 m/s; 0,57 m/s. Incertezza di ciascuna: 0,006 m / 0,20 s = 0,03 m/s. b) Le velocità diminuiscono costantemente: fra il primo e l'ultimo intervallo la differenza è 0,81 − 0,57 = 0,24 m/s, molto più della somma delle incertezze (0,06 m/s): il moto non è uniforme. La risultante delle forze orizzontali non è nulla ed è opposta al moto (attrito). c) La velocità cala di 0,06 m/s ogni 0,20 s: decelerazione ≈ 0,06/0,20 = 0,30 m/s².

27. Sul blocco agiscono peso (78,4 N), reazione normale, forza F parallela al piano e attrito dinamico. Componente del peso lungo il piano: 78,4 N × sen 30° = 39,2 N; reazione normale: 78,4 N × cos 30° ≈ 67,9 N; attrito: 0,25 × 67,9 N ≈ 17,0 N. a) In salita l'attrito è rivolto verso il basso lungo il piano: F = 39,2 N + 17,0 N ≈ 56 N, verso l'alto lungo il piano. b) In discesa l'attrito è rivolto verso l'alto: la componente del peso (39,2 N) supera l'attrito (17,0 N), quindi per avere velocità costante serve una forza che trattenga il blocco, verso l'alto lungo il piano: F = 39,2 N − 17,0 N ≈ 22 N.

28. In entrambe le fasi la velocità è costante, quindi $\boldsymbol{R} = \mathbf{0}$ e la forza dell'aria è uguale al peso: $F_{\text{aria}} = 75\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} \approx 7{,}4 \times 10^2$ N, sia a 55 m/s sia a 5,0 m/s. È uguale nei due casi: il paracadute aperto produce la stessa forza a una velocità molto più bassa. La velocità costante non dice quanto è grande una forza, ma che le forze si compensano.

29. Senza attriti la pallina risale fino a 0,40 m di altezza; il tratto è $L = h/\text{sen}\ \alpha$. 20°: 0,40 m / 0,342 ≈ 1,2 m; 10°: 0,40 m / 0,174 ≈ 2,3 m; 5°: 0,40 m / 0,0872 ≈ 4,6 m. Quando α si avvicina a 0° la lunghezza cresce senza limite: sul piano orizzontale la pallina non si fermerebbe mai.

30. Traccia di risposta. L'errore è attribuire l'arresto alla mancanza di una spinta. Dopo il calcio nessuna forza spinge il pallone in avanti; su di esso agiscono il peso, la reazione del terreno, l'attrito con l'erba e la resistenza dell'aria, rivolti all'indietro. La risultante non è nulla e il pallone rallenta fino a fermarsi. Senza queste forze, per il primo principio, continuerebbe a muoversi di moto rettilineo uniforme. Prova: su una superficie più liscia, come un pavimento di linoleum, lo stesso calcio fa rotolare il pallone molto più lontano.

31. Traccia di risposta. Dalla strada, sul trolley la risultante delle forze orizzontali è (quasi) nulla, quindi tende a conservare la sua velocità. a) In frenata l'auto rallenta, il trolley prosegue: si sposta in avanti rispetto all'auto e può colpire i sedili anteriori. b) In curva a sinistra l'auto cambia direzione, il trolley tende a proseguire in linea retta: rispetto all'auto si sposta verso destra. c) Nel tamponamento l'auto viene spinta in avanti, il trolley resta indietro: rispetto all'auto si sposta verso lo schienale. In tutti e tre i casi il passeggero (sistema non inerziale) vede il trolley mettersi in moto «da solo»; a velocità costante su un rettilineo, invece, il trolley resta fermo sul sedile.

32. Traccia di risposta. Posa la pallina ferma sul pavimento (o, meglio, appendila a un filo come un pendolo). Se il treno accelera, la pallina rotola verso il fondo del vagone (il filo si inclina all'indietro); se frena, rotola in avanti; se procede a velocità costante (o è fermo), resta ferma e il filo è verticale. Non è possibile distinguere fra treno fermo e treno in moto rettilineo uniforme con un esperimento interno al vagone: in entrambi i casi il vagone è un sistema inerziale e i fenomeni si svolgono allo stesso modo (è il risultato della «gran nave» di Galileo, che studierai a fondo negli anni successivi). Errori possibili: un binario in leggera pendenza o un pavimento non orizzontale, che farebbero rotolare la pallina anche a velocità costante; conviene controllare il pavimento con il treno fermo.