CAPITOLO

3

I sistemi non inerziali e le forze apparenti

Le leggi di Newton valgono per ogni osservatore, purché chi accelera o gira accetti di pagare un prezzo: qualche forza che nessun corpo esercita.

OBIETTIVI

1. Riconoscere un sistema di riferimento non inerziale e ricavare la relazione fra le accelerazioni misurate in due sistemi in moto traslatorio.
2. Usare la forza apparente $-m\boldsymbol{A}$ e la gravità efficace per risolvere problemi nei veicoli che accelerano e in ascensore, confrontando sempre la soluzione con quella dal suolo.
3. Descrivere i sistemi rotanti con la forza centrifuga e spiegare il funzionamento di rotori, centrifughe e stazioni spaziali rotanti.
4. Descrivere la forza di Coriolis, il verso della deviazione e il suo ordine di grandezza.
5. Spiegare con le forze apparenti gli effetti della rotazione terrestre: il valore di g all'equatore, il verso dei cicloni, il pendolo di Foucault.
6. Misurare con l'accelerometro di uno smartphone un'accelerazione centripeta e confrontarla con la previsione teorica.

INDICE DEL CAPITOLO

3.1 Quando il primo principio non vale 2
3.2 I sistemi che traslano con accelerazione costante 4
3.3 I sistemi rotanti e la forza centrifuga 9
3.4 La forza di Coriolis 12
3.5 La Terra, un sistema non inerziale 14

Fisica 3 · Parte I · Le leggi del moto e i sistemi di riferimento · versione 1.0
Capitolo 3: I sistemi non inerziali e le forze apparenti · pagine 73–96 del volume completo · estratto per lo studio

Sei su un autobus che frena di colpo: senti una spinta in avanti e ti aggrappi al sostegno. Un aereo accelera sulla pista e ti schiaccia contro lo schienale. In una giostra che gira ti senti tirato verso l'esterno. In tutti questi casi «senti» una forza, ma nessun corpo te la applica: nel volume dello scorso anno (*Fisica 2*, capitoli 4 e 7) hai imparato a spiegare queste sensazioni guardando la scena dal suolo, dove contano solo le forze vere e il primo principio.

In questo capitolo facciamo il passo opposto: restiamo **dentro** il veicolo che accelera o che gira, e ci chiediamo come si scrivono lì le leggi della dinamica. Vedremo che si può fare, a un prezzo preciso: aggiungere alle forze vere alcune forze che non sono esercitate da nessun corpo, le forze apparenti. È un prezzo che conviene pagare spesso, perché il punto di vista interno è quello del passeggero, del pilota, dell'astronauta, e, per ognuno di noi, quello della Terra che ruota. Nel capitolo 2 hai visto che tutti i sistemi inerziali sono equivalenti; ora studiamo quelli che non lo sono.

3.1 Quando il primo principio non vale

3.1.1 L'autobus visto da dentro

Riprendiamo l'esperimento del volume dello scorso anno: una bottiglietta appoggiata sul pavimento liscio di un autobus che frena con decelerazione di 4,0 m/s^2. Dal suolo, cioè da un sistema di riferimento inerziale, nessuna forza orizzontale agisce sulla bottiglietta, che prosegue di moto rettilineo uniforme mentre l'autobus rallenta. Per il passeggero, invece, la bottiglietta parte da ferma e scivola in avanti con accelerazione 4,0 m/s^2, senza che niente la spinga. Nel sistema dell'autobus il primo principio non vale: è un sistema di riferimento non inerziale.

Qual è il legame fra le due descrizioni? Chiamiamo S il sistema del suolo, inerziale, e S′ quello dell'autobus, che ha rispetto a S un'accelerazione $\boldsymbol{A}$. Nel capitolo 2 hai ricavato dalle trasformazioni di Galileo la composizione delle velocità, $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$, dove $\boldsymbol{V}$ è la velocità di S′ rispetto a S. La formula vale istante per istante anche se $\boldsymbol{V}$ cambia nel tempo, purché S′ non ruoti rispetto a S e il tempo sia lo stesso nei due sistemi (l'ipotesi del tempo assoluto). In un piccolo intervallo Δt le variazioni di velocità si sommano allo stesso modo, $\Delta\boldsymbol{v} = \Delta\boldsymbol{v}' + \Delta\boldsymbol{V}$; dividendo per Δt e facendo tendere Δt a zero si ottiene

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$$

L'accelerazione di un corpo misurata dal suolo è la somma di quella misurata nel veicolo e dell'accelerazione $\boldsymbol{A}$ del veicolo, che, come la velocità di trascinamento del capitolo 2, si chiama **accelerazione di trascinamento**. Se $\boldsymbol{A} = 0$ ritrovi il risultato del capitolo 2: fra sistemi in moto relativo uniforme l'accelerazione è invariante. Se $\boldsymbol{A} \neq 0$ non lo è più, e qui sta tutta la differenza

fra sistemi inerziali e non inerziali. Un sistema che si muove così, senza ruotare, si chiama **sistema in moto traslatorio** (o sistema traslante): tutti i suoi punti hanno, istante per istante, la stessa accelerazione $\boldsymbol{A}$. È il caso dell'autobus su un rettilineo, dell'ascensore, del treno che parte.

3.1.2 La forza apparente

Nel sistema S vale il secondo principio: $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$, dove $\boldsymbol{F}$ è la risultante delle forze vere, quelle esercitate da altri corpi. Sostituiamo $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$ e portiamo il termine $m\boldsymbol{A}$ al primo membro:

$$\boldsymbol{F} + (-m\boldsymbol{A}) = m\boldsymbol{a}'$$

È la stessa forma del secondo principio, scritta con l'accelerazione $\boldsymbol{a}'$ misurata in S′, a patto di aggiungere alle forze vere un termine in più, la forza apparente

$$\boldsymbol{F}_{\text{app}} = -m\boldsymbol{A}$$

Nel volume dello scorso anno la forza apparente era solo un nome, citato in un approfondimento; ora è uno strumento di calcolo, con un'espressione precisa. Le sue proprietà vanno ricordate una per una.

- **Non è esercitata da nessun corpo.** Per questo non ha una reazione: il terzo principio non si applica alle forze apparenti.
- **È opposta all'accelerazione del sistema.** Se l'autobus frena, $\boldsymbol{A}$ punta all'indietro e la forza apparente punta in avanti, proprio come la spinta che senti.
- **È proporzionale alla massa del corpo**, come il peso: tutti i corpi nel veicolo ne subiscono una che dà loro la stessa accelerazione $-\boldsymbol{A}$.
- **Esiste solo nel sistema non inerziale.** Chi descrive il moto da un sistema inerziale non deve mai aggiungerla.

Con la forza apparente il passeggero dell'autobus può fare i conti senza scendere a terra. Sulla bottiglietta agiscono il peso e la reazione del pavimento, che si equilibrano, e la forza apparente mA in avanti: per lui la bottiglietta accelera in avanti con $\boldsymbol{a}' = -\boldsymbol{A}$, cioè con 4,0 m/s^2. In 1,0 s si sposta in avanti di $\tfrac{1}{2} \times 4{,}0\ \text{m/s}^2 \times (1{,}0\ \text{s})^2 = 2{,}0$ m rispetto all'autobus: è lo stesso risultato che avevi trovato dal suolo nel volume dello scorso anno, dove 2,0 m era la differenza fra i 10 m percorsi dalla bottiglietta e gli 8,0 m percorsi dall'autobus. Le due descrizioni sono equivalenti: cambiano le parole, non le previsioni.

3.1.3 Un problema, due sistemi

Ogni problema di questo capitolo si può risolvere in due modi, e conviene sempre farlo in tutti e due, almeno all'inizio. Il metodo è quello che conosci, con un passo in più.

1. Scegli il sistema di riferimento e dichiaralo: il suolo (inerziale) oppure il veicolo (non inerziale).
2. Disegna il diagramma di corpo libero con le sole forze vere: peso, reazioni, tensioni, attriti.
3. Solo se il sistema scelto è non inerziale, aggiungi le forze apparenti: $-m\boldsymbol{A}$ in un sistema traslante; la forza centrifuga, e se il corpo si muove la forza di Coriolis, in un sistema rotante (paragrafi 3 e 4).
4. Scrivi il secondo principio per componenti, con l'accelerazione misurata nel sistema scelto: $\boldsymbol{a}$ dal suolo, $\boldsymbol{a}'$ dal veicolo.

> **ERRORE FREQUENTE**
> Mescolare i due punti di vista. Chi analizza un'auto in curva dal suolo e scrive «la forza centripeta è equilibrata dalla forza centrifuga» commette due errori in uno: dal suolo la forza centrifuga non esiste, e se esistesse la risultante sarebbe nulla e l'auto andrebbe diritta. Dal suolo l'auto **non** è in equilibrio: la risultante (l'attrito sugli pneumatici) è centripeta e le fa cambiare direzione. Nel sistema dell'auto, invece, il corpo è fermo e le forze, comprese le apparenti, si equilibrano. Le due descrizioni sono entrambe corrette, ma non vanno mai sommate: o tutte le forze vere con $\boldsymbol{a}$, o forze vere più apparenti con $\boldsymbol{a}'$.

3.2 I sistemi che traslano con accelerazione costante

3.2.1 Il pendolo nell'auto: un accelerometro

Appendi un piccolo peso a un filo, sotto lo specchietto di un'auto. Finché l'auto è ferma o va a velocità costante su un rettilineo, il filo resta verticale. Quando l'auto accelera, il filo si inclina all'indietro e resta inclinato di un angolo fisso finché l'accelerazione non cambia; in frenata si inclina in avanti. Dall'angolo si risale all'accelerazione dell'auto: il pendolo è un **accelerometro**, uno strumento che misura l'accelerazione del sistema in cui si trova.

ESEMPIO SVOLTO

Dall'inclinazione del filo all'accelerazione: la dimostrazione nei due sistemi

Problema. Un pendolino di massa m è appeso al tetto di un'auto che accelera in linea retta con accelerazione costante A. Dimostra che il filo forma con la verticale un angolo θ tale che $\tan\theta = A/g$, prima dal suolo e poi dall'auto.

Dal suolo (inerziale). 1) Sul pendolino agiscono il peso mg, verticale verso il basso, e la tensione T del filo, inclinata di θ. 2) Il pendolino è fermo rispetto all'auto, quindi ha la sua accelerazione: A, orizzontale in avanti. 3) Secondo principio per componenti, asse x in avanti e y verso l'alto: $T\,\text{sen}\,\theta = mA$ e $T\cos\theta - mg = 0$. 4) Dividendo membro a membro: $\tan\theta = A/g$.

Dall'auto (non inerziale). 1) Le forze vere sono le stesse. 2) Si aggiunge la forza apparente mA, orizzontale **all'indietro**. 3) Il pendolino è fermo, $\boldsymbol{a}' = 0$: lungo x, $T\,\text{sen}\,\theta - mA = 0$; lungo y, $T\cos\theta - mg = 0$. 4) Le stesse equazioni, quindi lo stesso risultato: $\tan\theta = A/g$.

Controllo. Se $A = 0$ si ha $\theta = 0$, filo verticale; se A fosse uguale a g il filo sarebbe inclinato di 45°. La massa del pendolino non compare in $\tan\theta$: tutti i pendolini nell'auto si inclinano dello stesso angolo, perché la forza apparente, come il peso, è proporzionale alla massa.

Applichiamo il risultato a un'auto che passa da 0 a 100 km/h in 10,0 s, con un pendolino di 50 g (Figura 3.1). 100 km/h = 27,78 m/s, quindi A = 27,78 m/s / 10,0 s = 2,78 m/s^2; $\tan\theta$ = 2,78/9,8 = 0,283, θ = 15,8°. Elevando al quadrato e sommando le due equazioni, $T = m\sqrt{(g^2 + A^2)}$ = 0,050 kg × 10,19 m/s^2 = 0,509 N, poco più del peso (0,490 N).

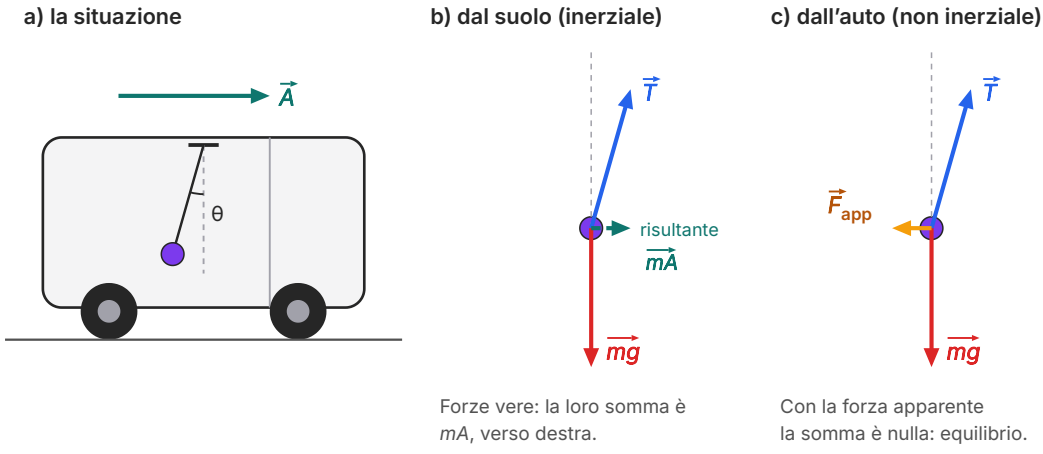

Figura 3.1 Un'auto passa da 0 a 100 km/h in 10,0 s, con accelerazione costante A = 2,78 m/s^2. a) Il pendolino appeso al tetto resta inclinato all'indietro di θ = 15,8°. b) Dal suolo agiscono due forze vere, la tensione $\boldsymbol{T}$ e il peso $m\boldsymbol{g}$: la loro somma è $m\boldsymbol{A}$, orizzontale, perché il pendolino accelera con l'auto. c) Nel sistema dell'auto il pendolino è fermo: alle forze vere si aggiunge la forza apparente $-m\boldsymbol{A}$ e la somma è nulla. Le forze sono in scala per una massa di 50 g.

3.2.2 La gravità efficace

Nel sistema dell'auto il peso e la forza apparente agiscono insieme su ogni corpo, e sono entrambi proporzionali alla massa. Conviene allora sommarli in una sola forza, $m\boldsymbol{g}_{\text{eff}}$, dove

$$\boldsymbol{g}_{\text{eff}} = \boldsymbol{g} - \boldsymbol{A}$$

è l'**accelerazione di gravità efficace**: quella con cui cade un corpo lasciato libero nel veicolo, misurata da chi sta nel veicolo. Per il passeggero tutto va come se la gravità fosse $\boldsymbol{g}_{\text{eff}}$: il pendolino si dispone lungo $\boldsymbol{g}_{\text{eff}}$, che indica la **verticale locale**, cioè la direzione del filo a piombo nel sistema scelto. Nell'auto dell'esempio $g_{\text{eff}} = \sqrt{(g^2 + A^2)} = 10{,}19\ \text{m/s}^2$, inclinata all'indietro di 15,8°. Anche la superficie del caffè in una tazza, che in quiete è perpendicolare alla verticale, si dispone perpendicolare a $\boldsymbol{g}_{\text{eff}}$: in accelerazione il caffè si alza dalla parte della tazza rivolta verso il retro dell'auto.

Un effetto curioso: un palloncino pieno di elio, legato al sedile, in accelerazione si sposta **in avanti**, mentre tutto il resto va all'indietro. La spinta di Archimede (*Fisica 1*, capitolo 14) è opposta alla gravità, e nel sistema dell'auto la gravità è $\boldsymbol{g}_{\text{eff}}$: l'aria, più densa, si accumula verso il retro dell'abitacolo e il palloncino, più leggero dell'aria, «sale» in direzione opposta a $\boldsymbol{g}_{\text{eff}}$, cioè in avanti.

3.2.3 L'ascensore visto da dentro

Nel volume dello scorso anno hai studiato la persona sulla bilancia in ascensore dal suolo, trovando $N = m(g + a)$ con a positiva verso l'alto. Rifacciamo l'analisi dentro la cabina (Figura 3.2). Asse verso l'alto, A accelerazione della cabina (positiva se verso l'alto). Sul pacco agiscono il peso mg, la reazione N della bilancia e, nel sistema della cabina, la forza apparente $-mA$. Il pacco è fermo sulla bilancia, quindi

$$N - mg - mA = 0 \quad \Rightarrow \quad N = m(g + A)$$

È lo stesso risultato, ma letto in un altro modo: nella cabina la gravità efficace vale $g_{\text{eff}} = g + A$, e la bilancia misura il peso apparente mg_{eff}. Se la cabina accelera verso l'alto (partenza in salita o frenata in discesa) la gravità efficace è più intensa; se accelera verso il basso è più debole. Se il cavo si spezzasse e la cabina cadesse liberamente, $A = -g$ e $g_{\text{eff}} = 0$: la forza apparente mg verso l'alto annullerebbe esattamente il peso, la bilancia segnerebbe zero e gli oggetti lasciati andare resterebbero sospesi a mezz'aria. È la condizione di assenza di peso, che dal suolo avevi spiegato dicendo che tutto cade insieme: dentro la cabina diventa «gravità efficace nulla».

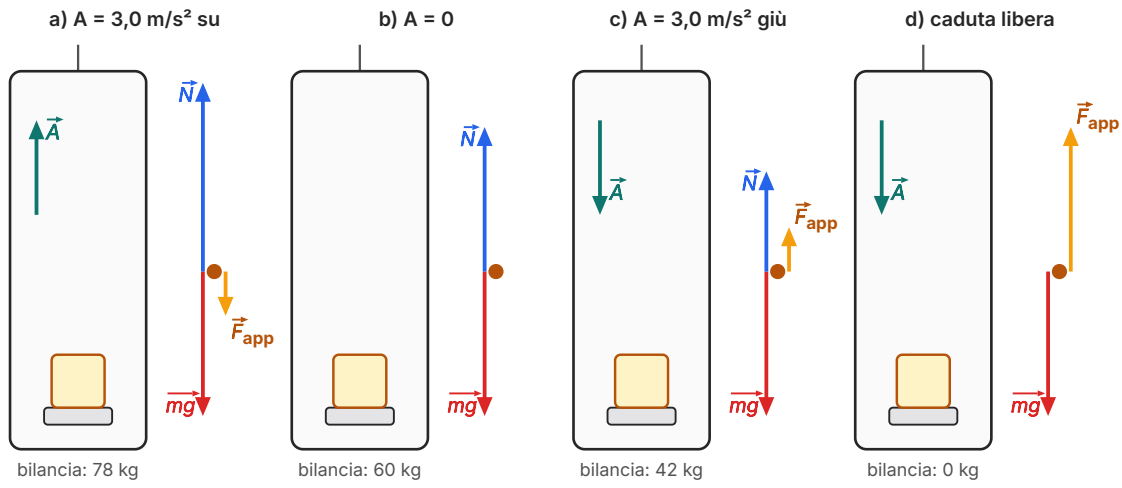

Figura 3.2 Un pacco di 60 kg su una bilancia in ascensore, visto da chi sta nella cabina. Le forze sono in scala; A è l'accelerazione della cabina rispetto al suolo. a) A verso l'alto, di modulo 3,0 m/s^2: la forza apparente punta in basso e la bilancia segna 768 N, cioè 78 kg. b) $A = 0$ (cabina ferma o in moto uniforme): nessuna forza apparente. c) A verso il basso: la forza apparente punta in alto, la bilancia segna 408 N (42 kg). d) In caduta libera la forza apparente annulla il peso e la bilancia segna zero.

ESEMPIO SVOLTO

Le chiavi cadute in ascensore

Problema. Luca, di massa 55 kg, è su una bilancia in un ascensore che parte verso l'alto con accelerazione 1,2 m/s^2. In quell'istante gli sfuggono di mano le chiavi, a 1,40 m dal pavimento. a) Che cosa segna la bilancia? b) Quanto tempo impiegano le chiavi a toccare il pavimento? c) Confronta con l'ascensore fermo.

Soluzione nel sistema della cabina. a) Su Luca agiscono il peso, la reazione della bilancia e la forza apparente mA verso il basso; fermo nella cabina: $N = m(g + A) = 55\ \text{kg} \times 11{,}0\ \text{m/s}^2 = 605$ N. La bilancia divide per 9,8 N/kg e mostra 61,7 kg, circa 62 kg. b) Nella cabina le chiavi partono da ferme e cadono con la gravità efficace $g_{\text{eff}} = 11{,}0\ \text{m/s}^2$: $t = \sqrt{(2h/g_{\text{eff}})} = \sqrt{(2 \times 1{,}40\ \text{m} / 11{,}0\ \text{m/s}^2)} = 0{,}50$ s. c) Ad ascensore fermo $t = \sqrt{(2 \times 1{,}40\ \text{m} / 9{,}8\ \text{m/s}^2)} = 0{,}53$ s.

Controllo dal suolo. Nell'istante in cui cadono, chiavi e pavimento hanno la stessa velocità u. Poi le chiavi sono in caduta libera, $y_c = h + ut - \tfrac{1}{2}gt^2$, mentre il pavimento accelera verso l'alto, $y_p = ut + \tfrac{1}{2}At^2$. Si incontrano quando $h = \tfrac{1}{2}(g + A)t^2$: la stessa equazione, qualunque sia u. Dal suolo le chiavi non cadono «più in fretta»: è il pavimento che va loro incontro.

DA RICORDARE

Le forze apparenti sono proporzionali alla massa, esattamente come il peso, e per questo danno a tutti i corpi la stessa accelerazione. Dentro una cabina chiusa nessun esperimento meccanico permette di distinguere un'accelerazione $\boldsymbol{A}$ verso l'alto da una gravità un po' più intensa: la bilancia, il pendolo e la caduta delle chiavi rispondono allo stesso modo. Questo legame profondo fra inerzia e gravità, che hai incontrato come equivalenza fra massa inerziale e massa gravitazionale (*Fisica 2*, capitolo 5), è il punto di partenza della relatività generale di Einstein, che porta il nome di principio di equivalenza: lo incontrerai al quinto anno.

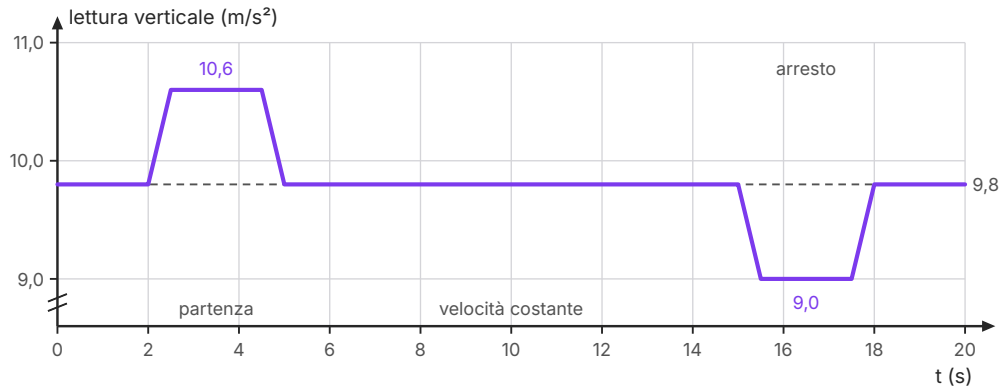

Figura 3.3 Lettura verticale dell'accelerometro di uno smartphone sul pavimento di un ascensore che sale da fermo e si ferma (andamento tipico, ricostruito con un modello: accelerazione di 0,8 m/s^2 raggiunta in 0,5 s). Fuori dalle fasi di partenza e di arresto la lettura è 9,8 m/s^2, sia con la cabina ferma sia in moto uniforme. L'asse verticale parte da 8,6 m/s^2.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere la registrazione di un accelerometro

Problema. Uno smartphone appoggiato sul pavimento di un ascensore registra la componente verticale della lettura del suo accelerometro durante una corsa (Figura 3.3). Il sensore contiene una minuscola massa trattenuta da molle e misura la forza che le molle esercitano su di essa, divisa per la massa: a telefono fermo sul tavolo legge 9,8 m/s^2, in caduta libera legge zero. La sua lettura è quindi la gravità efficace $g_{\text{eff}} = g + A$. a) L'ascensore sale o scende? b) Quanto vale l'accelerazione durante la partenza? c) Qual è la velocità massima? d) Di quanto si sposta la cabina?

Soluzione. a) All'inizio la lettura supera 9,8 m/s^2: $A > 0$, la cabina accelera verso l'alto partendo da ferma, quindi sale; alla fine la lettura scende sotto 9,8 m/s^2 mentre la cabina rallenta fino a fermarsi. b) Sul tratto piatto della partenza $A = 10{,}6 - 9{,}8 = 0{,}8$ m/s^2. c) La variazione di velocità è l'area fra la curva e la retta 9,8 m/s^2: un trapezio con basi 3,0 s e 2,0 s e altezza 0,8 m/s^2, cioè ½ × (3,0 s + 2,0 s) × 0,8 m/s^2 = 2,0 m/s. d) Fra 5 s e 15 s la cabina sale a 2,0 m/s e percorre 20 m; nelle due fasi di accelerazione, che durano 3,0 s ciascuna e partono o arrivano a velocità nulla, la velocità media è circa la metà di quella massima e la cabina percorre circa 3 m in ognuna. In tutto circa 26 m, otto o nove piani.

Controllo. L'area sotto la curva durante l'arresto è uguale e opposta a quella della partenza: la cabina parte e arriva ferma. Una lettura costante di 9,8 m/s^2 non dice se l'ascensore è fermo o in moto uniforme: l'accelerometro, come ogni esperimento fatto nella cabina, non può rivelare il moto uniforme (principio di relatività galileiana, capitolo 2).

3.2.4 Il passeggero che frena

In una frenata energica un'auto può decelerare di circa 7 m/s^2. Per un passeggero di 70 kg la forza apparente, nel sistema dell'auto, vale 70 kg × 7 m/s^2 = 490 N, in avanti: quasi il peso di un compagno di classe. Per restare fermo sul sedile il passeggero ha bisogno di una forza vera uguale e opposta, che la cintura di sicurezza fornisce. Dal suolo la stessa cintura è la forza che decelera il passeggero insieme all'auto.

3.3 I sistemi rotanti e la forza centrifuga

3.3.1 Sulla piattaforma che gira

Un **sistema di riferimento rotante** è un sistema che ruota rispetto a un sistema inerziale, come una giostra, il cestello di una lavatrice o la Terra. Anche se ruota con velocità angolare ω costante non è inerziale: ogni suo punto, a distanza r dall'asse, ha un'accelerazione centripeta $\omega^2 r$ rispetto al suolo. A differenza del sistema traslante, però, l'accelerazione non è la stessa ovunque: cresce con la distanza dall'asse.

Consideriamo un corpo fermo su una piattaforma che gira, a distanza r dall'asse: un bambino seduto su una giostra. Dal suolo il bambino percorre una circonferenza e la risultante delle forze vere su di lui è la forza centripeta $m\omega^2 r$ (*Fisica 2*, capitolo 7), fornita dall'attrito del sedile o dalla spinta del sostegno a cui si tiene. Per chi gira con la giostra, invece, il bambino è fermo: perché il secondo principio valga anche lì serve una forza apparente uguale e opposta alla risultante centripeta, diretta lungo il raggio verso l'esterno. È la forza centrifuga:

$$F_{cf} = m\omega^2 r = m\frac{v^2}{r}$$

dove $v = \omega r$ è la velocità del corpo misurata dal suolo. Nel volume dello scorso anno la forza centrifuga compariva solo in un «errore frequente», perché tutti i problemi erano risolti dal suolo; ora diventa legittima, ma **soltanto** nel sistema rotante. È proprio la spinta verso l'esterno che il bambino sente: nel suo sistema la avverte come una gravità orizzontale, che cresce con il quadrato della velocità angolare e con la distanza dall'asse.

3.3.2 Il rotore da due punti di vista

Nel rotore, la giostra che hai studiato nel volume dello scorso anno, le persone stanno con la schiena contro la parete di un cilindro che gira; quando il pavimento si abbassa restano sospese (Figura 3.4). Prendiamo un cilindro di raggio 2,0 m, un coefficiente di attrito statico $\mu_s = 0{,}50$ e una persona di 60 kg, con $\omega = 3{,}5$ rad/s.

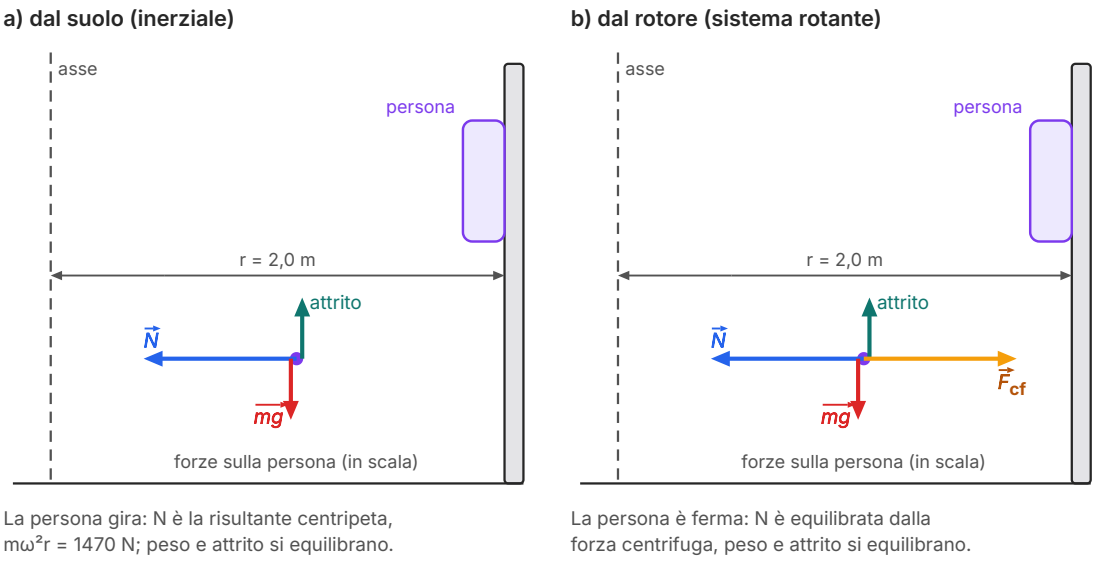

Figura 3.4 Il rotore in sezione, con le forze in scala su una persona di 60 kg a 2,0 m dall'asse; il cilindro ruota con $\omega = 3{,}5$ rad/s e $\mu_s = 0{,}50$. a) Dal suolo la reazione della parete è la risultante centripeta. b) Nel sistema del rotore la stessa reazione è equilibrata dalla forza centrifuga. I diagrammi delle forze sono in scala: $N = F_{cf} = 1470$ N, peso e attrito 588 N; le distanze no.

Dal suolo. Sulla persona agiscono il peso, la reazione N della parete, orizzontale verso l'asse, e l'attrito statico, verticale. Lungo la verticale non c'è accelerazione: l'attrito equilibra il peso, 588 N. Lungo il raggio la risultante è centripeta: $N = m\omega^2 r = 60\ \text{kg} \times (3{,}5\ \text{rad/s})^2 \times 2{,}0\ \text{m} = 1470\ \text{N}$.

Dal rotore. La persona è ferma. Lungo il raggio la reazione della parete, verso l'asse, è equilibrata dalla forza centrifuga, verso l'esterno: $N = F_{cf} = 1470$ N. Lungo la verticale l'attrito equilibra il peso. Per chi è dentro, la forza centrifuga «schiaccia» contro la parete come la gravità schiaccia contro il pavimento.

Le due descrizioni portano alla stessa condizione: l'attrito massimo $\mu_s N$ deve essere almeno uguale al peso, cioè $\mu_s m\omega^2 r \geq mg$, ovvero $\omega \geq \sqrt{(g/(\mu_s r))} = 3{,}13$ rad/s, un giro ogni 2,0 s. Con $\omega = 3{,}5$ rad/s l'attrito massimo vale 735 N, più dei 588 N necessari. La massa si semplifica: il rotore regge allo stesso modo un bambino e un adulto.

3.3.3 Centrifughe e cestelli

Una **centrifuga** è una macchina che fa ruotare rapidamente dei contenitori per separare componenti di densità diversa: il sangue in plasma e cellule, il latte in panna e latte magro, i fanghi dall'acqua. Il funzionamento si capisce bene nel sistema rotante. Dentro la provetta che gira la gravità efficace è dominata dalla parte centrifuga $\omega^2 r$, diretta verso il fondo della provetta e migliaia di volte più intensa di g. Per Archimede, le particelle più dense del liquido «affondano» verso il fondo, quelle meno dense «galleggiano» verso l'imboccatura, esattamente come in un bicchiere lasciato a riposare, ma enormemente più in fretta. Il processo si chiama **centrifugazione**. L'intensità di una centrifuga si indica con la **forza centrifuga relativa** (RCF), il rapporto $\omega^2 r/g$, espresso come multiplo di g («1000 × g»): nonostante il nome è un numero puro, non una forza.

ESEMPIO SVOLTO

La centrifuga del laboratorio di analisi

Problema. Una centrifuga per la separazione del sangue fa girare le provette a 3000 giri/min; il fondo di ogni provetta è a 10,0 cm dall'asse. a) Calcola l'accelerazione centripeta del fondo della provetta e la RCF. b) Una provetta piena ha massa 12 g: con quale forza il porta-provette la spinge? Descrivi la situazione nei due sistemi.

Soluzione. a) 3000 giri/min = 50 giri/s, quindi $\omega = 2\pi \times 50\ \text{s}^{-1} = 314$ rad/s. $\omega^2 r = (314\ \text{rad/s})^2 \times 0{,}100\ \text{m} = 9{,}87 \times 10^3\ \text{m/s}^2$; RCF = 9870 / 9,8 ≈ $1{,}01 \times 10^3$, cioè circa 1000 × g. b) Dal suolo il porta-provette esercita sulla provetta la forza centripeta $F = m\omega^2 r = 0{,}012\ \text{kg} \times 9870\ \text{m/s}^2 = 118$ N, verso l'asse: la provetta percorre una circonferenza. Nel sistema della centrifuga la provetta è ferma: la stessa spinta del porta-provette equilibra la forza centrifuga di 118 N, diretta verso l'esterno.

Controllo. Il peso della provetta, 0,12 N, è circa mille volte più piccolo e si può trascurare. 118 N è il peso di un corpo di 12 kg: per questo le provette devono essere robuste e disposte in modo simmetrico, altrimenti l'asse riceve una spinta laterale che fa vibrare tutta la macchina.

Il cestello della lavatrice funziona allo stesso modo: nel volume dello scorso anno (*Fisica 2*, capitolo 3) hai calcolato che a 1200 giri/min il bordo ha un'accelerazione di migliaia di m/s^2. Nel sistema del cestello i panni sono premuti contro la parete dalla forza centrifuga e la parete li trattiene; l'acqua, che dove ci sono i fori non è trattenuta da nulla, esce verso l'esterno.

COLLEGAMENTI

Astronauti, voli parabolici e gravità artificiale

A bordo della Stazione Spaziale Internazionale, che orbita a circa 400 km di quota, l'attrazione della Terra non è affatto sparita: vale circa 8,7 m/s^2, l'89% del valore al suolo (lo calcolerai nel capitolo 13). Gli astronauti galleggiano perché la stazione e tutto ciò che contiene sono in caduta libera intorno alla Terra: nel sistema della stazione la forza apparente annulla il peso e la gravità efficace è quasi nulla. Si parla di **microgravità**, perché piccoli effetti residui (l'attrito con la tenue atmosfera, la diversa distanza dalla Terra dei vari punti della stazione) lasciano accelerazioni piccolissime, dell'ordine di un milionesimo di g o poco più.

Sulla Terra la stessa condizione si ottiene per una ventina di secondi con il **volo parabolico**: un aereo spegne quasi del tutto la spinta dei motori e, compensando solo la resistenza dell'aria, segue la traiettoria di un proiettile; nella cabina la gravità efficace è nulla. Le agenzie spaziali usano questi voli per l'addestramento e per gli esperimenti.

Per i lunghi viaggi spaziali si studia l'opposto: produrre una **gravità artificiale** facendo ruotare la stazione. In un anello di raggio r che gira con velocità angolare ω gli astronauti sono premuti contro il «pavimento», cioè la parete esterna, dalla forza centrifuga. Per avere $g_{\text{eff}} = 9{,}8\ m/s^2$ con $r = 100$ m serve $\omega = \sqrt{(g/r)} = 0{,}313$ rad/s, cioè un giro ogni 20 s, circa 3 giri al minuto. Con un anello più piccolo la rotazione dovrebbe essere più rapida, e la differenza di gravità fra testa e piedi e gli effetti della forza di Coriolis, che vedremo fra poco, diventerebbero fastidiosi.

3.4 La forza di Coriolis

3.4.1 Una pallina sulla piattaforma

Finora abbiamo considerato corpi fermi nel sistema rotante. Che cosa succede se il corpo si muove? Su una grande piattaforma che ruota in verso antiorario, vista dall'alto, una pallina viene lanciata dal centro verso il bordo e scorre senza attrito (Figura 3.5). Dal suolo la pallina non subisce forze orizzontali e va in linea retta. Ma mentre avanza, la piattaforma le gira sotto: una linea dipinta lungo il raggio, che all'inizio coincideva con la traiettoria, resta indietro. Per chi sta sulla piattaforma la pallina descrive una curva e devia **verso destra** rispetto alla direzione in cui si muove.

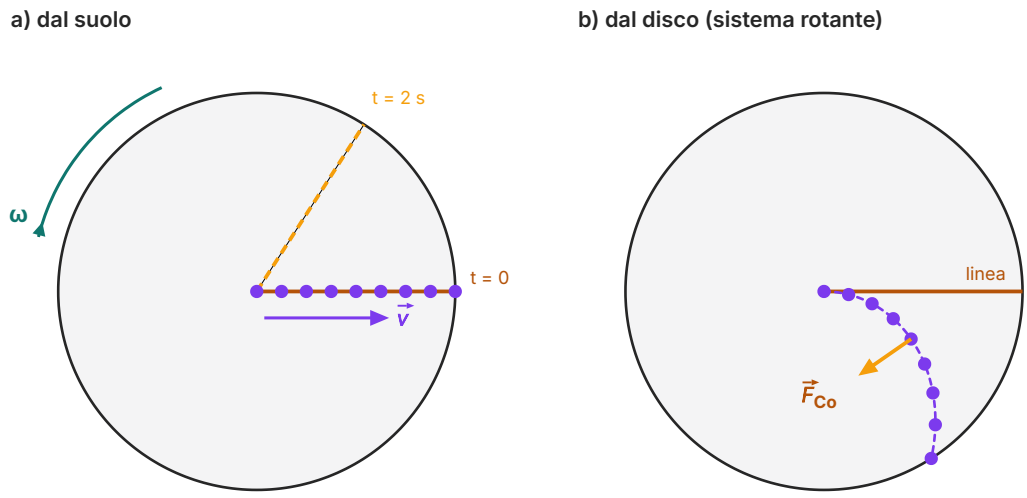

Figura 3.5 Una piattaforma di raggio 2,0 m ruota in verso antiorario con ω = 0,5 rad/s; una pallina parte dal centro a 1,0 m/s e scorre senza attrito. I punti indicano le posizioni ogni 0,25 s. a) Dal suolo la traiettoria è rettilinea, mentre la linea dipinta sulla piattaforma ruota di 1,0 rad (57°) nei 2,0 s del moto. b) Nel sistema della piattaforma la stessa pallina descrive una spirale e devia verso destra; la freccia indica la forza di Coriolis, perpendicolare alla velocità. Traiettorie calcolate.

Per spiegare la curva, chi sta sulla piattaforma deve introdurre una seconda forza apparente, la **forza di Coriolis**, dal nome del matematico francese Gaspard-Gustave Coriolis, che la studiò nell'Ottocento. Le sue proprietà:

- agisce solo sui corpi che **si muovono** rispetto al sistema rotante: su un corpo fermo nel sistema rotante c'è solo la forza centrifuga;
- è perpendicolare sia alla velocità del corpo (misurata nel sistema rotante) sia all'asse di rotazione;
- se il sistema ruota in verso antiorario, visto dall'alto, devia i corpi verso destra rispetto al loro moto; se ruota in verso orario, verso sinistra;
- per un corpo di massa m che si muove con velocità v perpendicolare all'asse ha modulo $F_{Co} = 2mv\omega$.

L'ultima formula la accettiamo senza dimostrarla in generale, ma possiamo controllarla sulla pallina della Figura 3.5. Dopo un tempo t breve la pallina è a distanza vt dal centro, e nel frattempo la linea dipinta è ruotata dell'angolo ωt. La distanza fra la pallina e la linea è un arco di raggio vt e angolo ωt, cioè ωvt^2. Uno spostamento laterale che cresce come $\frac{1}{2}\, at^2$ è quello di un

moto uniformemente accelerato, con $a = 2v\omega$: proprio l'accelerazione che la forza di Coriolis imprime, F_{Co}/m. Con i numeri della figura, $2 \times 1{,}0$ m/s $\times$ 0,5 rad/s = 1,0 m/s^2.

Poiché è sempre perpendicolare alla velocità, la forza di Coriolis cambia la direzione del moto ma non il modulo della velocità: non compie lavoro, come la forza centripeta di un moto circolare uniforme. Sulla pallina che si allontana dal centro agisce anche la forza centrifuga, che invece la fa accelerare lungo il raggio. Nel sistema rotante, dunque, un corpo in moto subisce due forze apparenti; dal suolo, nessuna.

La forza di Coriolis spiega l'esperienza sconcertante di chi prova a lanciare una palla a un amico seduto dall'altra parte di una giostra che gira: la palla, che dal suolo viaggia in linea retta, per chi è sulla giostra curva e manca il bersaglio. Per fare centro bisogna mirare «storto», tenendo conto che la giostra gira mentre la palla vola.

3.5 La Terra, un sistema non inerziale

3.5.1 Quanto ruota la Terra

Il suolo, che finora abbiamo trattato come inerziale, ruota insieme alla Terra: un giro completo rispetto alle stelle in un giorno siderale, 86 164 s. La velocità angolare è $\omega = 2\pi/(86\,164\text{ s}) = 7{,}292 \times 10^{-5}$ rad/s. È molto piccola, e per questo negli esperimenti di laboratorio il suolo è un ottimo sistema inerziale. Ma su grandi distanze, o in misure molto precise, gli effetti della rotazione si vedono, e sono proprio quelli delle forze centrifuga e di Coriolis. (Anche il moto della Terra intorno al Sole rende il suolo non inerziale, ma i suoi effetti sono ancora più piccoli.)

3.5.2 La gravità efficace cambia con la latitudine

Un corpo fermo all'equatore percorre ogni giorno una circonferenza di raggio uguale al raggio equatoriale, $6{,}378 \times 10^6$ m. Nel sistema della Terra subisce una forza centrifuga per unità di massa $\omega^2 R = (7{,}292 \times 10^{-5}\text{ rad/s})^2 \times 6{,}378 \times 10^6\text{ m} = 0{,}0339\text{ m/s}^2$, diretta verso l'alto, che riduce la gravità efficace di circa lo 0,35%. Ai poli, sull'asse, la forza centrifuga è nulla. Alle latitudini intermedie la distanza dall'asse è minore e la forza centrifuga, perpendicolare all'asse e non al suolo, inclina di poco la verticale locale: a 45° il filo a piombo devia di circa 0,1° dalla direzione del centro della Terra.

Le misure danno $g \approx 9{,}832$ m/s^2 ai poli e 9,780 m/s^2 all'equatore: una differenza di 0,052 m/s^2. La rotazione ne spiega circa due terzi (0,034 m/s^2); il resto dipende dalla forma della Terra. La Terra infatti non è una sfera: ha uno **schiacciamento polare**, cioè è leggermente appiattita ai poli e rigonfia all'equatore, dove il raggio supera di circa 21 km quello polare, e alla superficie un punto dell'equatore è più lontano dal centro di un punto dei poli. Anche lo schiacciamento, del resto, è un effetto della rotazione: Newton lo previde nei *Principia* (1687), e nel Settecento le spedizioni francesi in Lapponia e in Perù lo confermarono misurando la lunghezza di un grado di meridiano a latitudini diverse.

APPROFONDIMENTO

Il pendolo di Foucault e il secchio di Newton

Come si può dimostrare che la Terra ruota, senza guardare il cielo? Nel 1851, a Parigi, il fisico Léon Foucault appese sotto la cupola del Panthéon una sfera di 28 kg a un filo lungo 67 m e la fece oscillare. Il piano in cui un pendolo oscilla non ha motivo di ruotare rispetto alle stelle: nessuna forza vera lo fa girare. Eppure il pubblico vide il piano di oscillazione ruotare lentamente in verso orario rispetto al pavimento, di circa 11° all'ora. Era il pavimento, con la Terra, a ruotare sotto il pendolo. Nel sistema della Terra la rotazione del piano si spiega con la forza di Coriolis, che a ogni oscillazione devia di poco il pendolo verso destra. Al polo il piano farebbe un giro completo in un giorno siderale; alla latitudine φ il periodo è il giorno siderale diviso per sen φ, a Parigi circa 32 ore. Il **pendolo di Foucault** è la più celebre prova di laboratorio della rotazione terrestre, e copie dell'apparato si trovano oggi in molti musei della scienza.

Un secolo e mezzo prima Newton si era posto la stessa domanda in modo più astratto. Nei *Principia* (1687) descrive un secchio pieno d'acqua appeso a una corda attorcigliata: quando il secchio comincia a girare, la superficie dell'acqua resta piatta; poi l'acqua prende a ruotare con il secchio e la superficie si incurva, alzandosi verso le pareti. L'acqua «sente» la propria rotazione, anche quando è ferma rispetto al secchio. Per Newton la prova che la rotazione è assoluta, e non solo relativa ad altri corpi: si riconosce dai suoi effetti, che oggi chiamiamo forze centrifughe. Il moto rettilineo uniforme, invece, non lascia traccia (capitolo 2). La discussione su che cosa rispetto a cui si ruoti continuò per secoli, e fu ripresa da Einstein.

3.5.3 Cicloni e anticicloni

La Terra, vista dal polo nord, ruota in verso antiorario. Per un corpo che si muove orizzontalmente nell'emisfero nord la forza di Coriolis devia quindi il moto **verso destra**; nell'emisfero sud, dove la rotazione vista dall'alto appare oraria, verso sinistra. Per il moto orizzontale conta solo la componente della rotazione lungo la verticale del luogo, ω sen φ alla latitudine φ: l'effetto è massimo ai poli e si annulla all'equatore.

Nel capitolo 2 hai incontrato l'argomento della torre: una pietra lasciata cadere da una torre molto alta tocca terra un poco spostata verso oriente. Dal suolo, che non è inerziale, la deviazione è dovuta alla forza di Coriolis, che su un corpo in caduta punta verso est (in entrambi gli emisferi). Da un sistema inerziale la spiegazione è ancora più semplice: la cima della torre è più lontana dall'asse terrestre della base e, ruotando con la Terra, si muove verso est un po' più in fretta; la pietra conserva quella velocità mentre cade e arriva un poco più a est del piede della torre. Per una torre di 100 m alle nostre latitudini lo spostamento è di circa 1,5 cm (il calcolo esatto richiede l'analisi matematica).

L'effetto più spettacolare riguarda l'atmosfera. Un **ciclone** è una vasta zona di bassa pressione verso cui l'aria affluisce da ogni parte; un **anticiclone** è una zona di alta pressione da cui l'aria defluisce. Nell'emisfero nord l'aria che si dirige verso il centro di bassa pressione viene de-

viata verso destra, non arriva al centro e finisce per girargli intorno in verso **antiorario**; nell'emisfero sud in verso orario (Figura 3.6). Intorno agli anticicloni il verso è opposto. Le immagini dei satelliti mostrano chiaramente le spirali delle perturbazioni, e quelle dei **cicloni tropicali** (uragani, tifoni), che girano sempre in verso antiorario a nord dell'equatore e orario a sud. I cicloni tropicali non si formano quasi mai a pochi gradi dall'equatore, dove la deviazione di Coriolis del moto orizzontale è troppo debole.

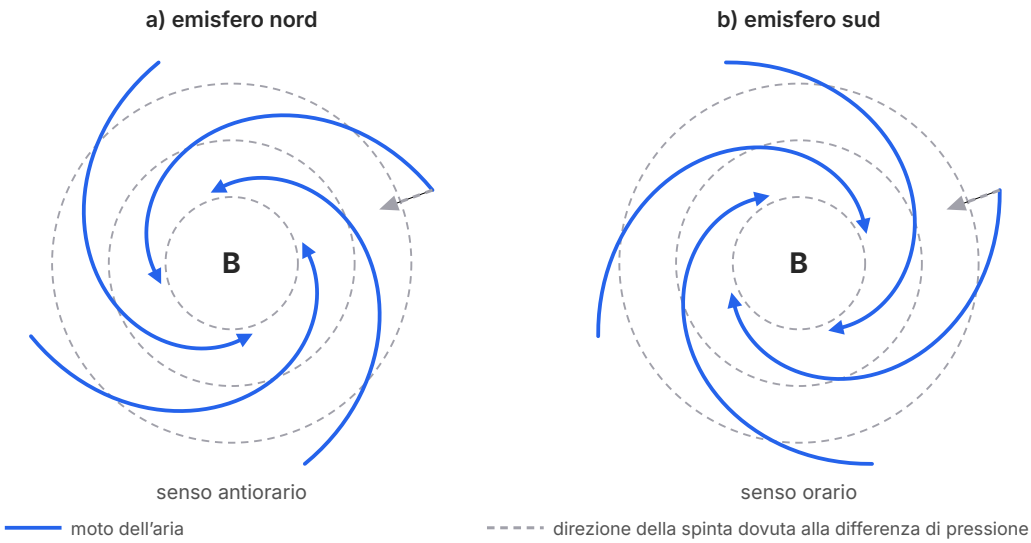

Figura 3.6 Schema della circolazione intorno a un centro di bassa pressione (B), visto dall'alto. L'aria è spinta verso il centro dalla differenza di pressione (freccia tratteggiata), ma la forza di Coriolis la devia verso destra nell'emisfero nord e verso sinistra nell'emisfero sud: ne risulta una spirale antioraria (a) od oraria (b). Le circonferenze tratteggiate sono le isobare. Disegno schematico, non in scala.

ERRORE FREQUENTE

«Nell'emisfero nord l'acqua del lavandino scende nello scarico girando in senso antiorario.» Falso: in un lavandino la forza di Coriolis è troppo debole per decidere il verso del vortice. Per acqua che si muove a 0,1 m/s alla latitudine di 45°, l'accelerazione di Coriolis vale $2v\omega \operatorname{sen} \varphi \approx 1 \times 10^{-5}$ m/s^2, un milionesimo di g: i piccoli moti rimasti dal riempimento, la forma del lavandino e la posizione dello scarico contano molto di più. In una stessa casa due lavandini possono girare in versi opposti. L'effetto della rotazione terrestre si è osservato solo con vasche larghe e piatte e con acqua lasciata riposare per molte ore. Nei cicloni, invece, le distanze sono di centinaia di chilometri e i tempi di giorni: lì la piccola accelerazione di Coriolis ha il tempo di agire.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: l'accelerometro su un giradischi

Materiali. Un giradischi con le velocità di 33⅓ e 45 giri/min; uno smartphone con un'applicazione che registra le letture dell'accelerometro; nastro biadesivo; un righello (sensibilità 1 mm); un cronometro (sensibilità 0,01 s). Nel volume dello scorso anno avevi progettato questa misura in un esercizio (*Fisica 2*, capitolo 3): ora la realizziamo e la leggiamo con le forze apparenti.

Procedimento. 1) Si fissa il telefono sul piatto, sdraiato, con un lato rivolto verso l'asse, e si misura la distanza r fra l'asse e il punto in cui si trova il sensore. La posizione del sensore dentro il telefono si conosce solo approssimativamente (dalla scheda tecnica o con una prova preliminare): l'incertezza su r è di ±5 mm, molto più grande della sensibilità del righello. 2) Si avvia la rotazione e si misura con il cronometro il tempo di 10 giri: (18,0 ± 0,2) s a 33⅓ giri/min, (13,3 ± 0,2) s a 45 giri/min, dove l'incertezza tiene conto dei tempi di reazione. Il periodo è un decimo di questi tempi. 3) Si registra per 20 s la lettura dell'accelerometro lungo il raggio e se ne prendono il valore medio e la semidispersione. 4) Si ripete a due distanze dall'asse e con le due velocità.

Tabella 3.1 Accelerazione centripeta di un punto del piatto: previsione dal periodo e lettura dell'accelerometro (dati tipici di una prova).

giri/min	T (s)	r (m), ± 0,005	previsione $4\pi^2 r/T^2$ (m/s^2)	lettura (m/s^2)
33⅓	1,80 ± 0,02	0,080	0,97 ± 0,08	1,01 ± 0,03
33⅓	1,80 ± 0,02	0,120	1,46 ± 0,09	1,49 ± 0,03
45	1,33 ± 0,02	0,080	1,79 ± 0,17	1,83 ± 0,04
45	1,33 ± 0,02	0,120	2,68 ± 0,19	2,73 ± 0,05

Che cosa concludere. La previsione è $\omega^2 r = 4\pi^2 r/T^2$, con incertezza relativa uguale a quella di r più il doppio di quella di T: per esempio, a 33⅓ giri/min e r = 0,080 m, $0{,}005/0{,}080 + 2 \times 0{,}02/1{,}80 \approx 0{,}085$, cioè ± 0,08 m/s^2. In tutte e quattro le prove la differenza fra previsione e lettura è minore della somma delle incertezze (nella prima, 0,04 m/s^2 contro 0,11 m/s^2): le misure sono compatibili con la teoria. Le letture crescono come previsto: di un fattore 1,5 passando da 8 a 12 cm, di circa $(45/33⅓)^2 \approx 1{,}8$ passando alla velocità maggiore. L'incertezza dominante è quella su r, cioè sulla posizione del sensore.

Due punti di vista. L'accelerometro misura la forza che il suo supporto esercita sulla piccola massa interna, divisa per la massa. Dal suolo quella forza è centripeta e produce l'accelerazione $\omega^2 r$; nel sistema del giradischi equilibra la forza centrifuga, e il sensore la registra come una gravità orizzontale diretta verso l'esterno. Come lettura i due punti di vista coincidono.

Sicurezza. Il telefono va fissato bene, perché a 45 giri/min un oggetto libero scivola via; non si toccano il piatto o il braccio del giradischi mentre gira.

Per la relazione. Riporta la tabella con le incertezze, il calcolo di una previsione e il confronto teoria–esperimento per ogni riga. Discuti perché tutte le letture sono un po' più alte delle previsioni centrali: quale errore sistematico sulla distanza r lo spiegherebbe, e di quanti millimetri? Proponi un modo per ricavare r dalle misure stesse.

IN SINTESI

Le formule del capitolo

$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$ — l'accelerazione misurata nel sistema inerziale S è quella misurata in S′ più l'accelerazione $\boldsymbol{A}$ di S′; vale se S′ trasla senza ruotare (tempo assoluto).

$\boldsymbol{F}_{\text{app}} = -m\boldsymbol{A}$ — forza apparente (N) in un sistema che trasla con accelerazione $\boldsymbol{A}$ (m/s^2): opposta ad $\boldsymbol{A}$, proporzionale alla massa, senza reazione. Con le forze vere dà $\boldsymbol{F} + \boldsymbol{F}_{\text{app}} = m\boldsymbol{a}'$.

$\tan\theta = A/g$ — inclinazione di un pendolo in un veicolo che accelera orizzontalmente: il pendolo misura l'accelerazione.

$\boldsymbol{g}_{\text{eff}} = \boldsymbol{g} - \boldsymbol{A}$ — gravità efficace nel sistema accelerato; in ascensore $g_{\text{eff}} = g + A$ (A positiva verso l'alto) e la bilancia segna $m(g + A)$; in caduta libera $g_{\text{eff}} = 0$.

$F_{\text{cf}} = m\omega^2 r = mv^2/r$ — forza centrifuga (N), diretta lungo il raggio verso l'esterno, su un corpo a distanza r (m) dall'asse di un sistema che ruota con velocità angolare ω (rad/s). Solo nel sistema rotante.

$F_{\text{Co}} = 2mv\omega$ — forza di Coriolis (N) su un corpo che si muove con velocità v (m/s), perpendicolare all'asse, nel sistema rotante; è perpendicolare alla velocità e non compie lavoro. Rotazione antioraria vista dall'alto: deviazione verso destra.

$\omega^2 R \approx 0{,}034$ m/s^2 — effetto centrifugo della rotazione terrestre all'equatore; $\omega = 2\pi/(86\,164\text{ s}) = 7{,}29 \times 10^{-5}$ rad/s.

SINTESI

- Un sistema di riferimento che accelera rispetto a un sistema inerziale è non inerziale: in esso il primo principio non vale se si considerano solo le forze vere.
- Se S' trasla con accelerazione $\boldsymbol{A}$ rispetto a S, le accelerazioni si compongono come $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$; l'accelerazione è invariante solo se $\boldsymbol{A} = 0$.
- Nel sistema traslante si può usare il secondo principio aggiungendo la forza apparente $\boldsymbol{F}_{\text{app}} = -m\boldsymbol{A}$: non è esercitata da nessun corpo, non ha reazione ed è proporzionale alla massa.
- Ogni problema si può risolvere dal sistema inerziale, con le sole forze vere, oppure dal sistema non inerziale, con forze vere e apparenti: le previsioni coincidono, ma i due punti di vista non vanno mescolati.
- Un pendolo in un veicolo che accelera si inclina di θ con $\tan\theta = A/g$: è un accelerometro. Nel veicolo tutto avviene come se la gravità fosse $\boldsymbol{g}_{\text{eff}} = \boldsymbol{g} - \boldsymbol{A}$.
- In un ascensore la bilancia segna $m(g + A)$; in caduta libera la gravità efficace è nulla: è l'assenza di peso degli astronauti, che sono in caduta libera intorno alla Terra.
- In un sistema che ruota con velocità angolare ω, su un corpo a distanza r dall'asse agisce la forza centrifuga $F_{\text{cf}} = m\omega^2 r$, verso l'esterno; dal suolo esiste solo la risultante centripeta.
- Centrifughe, cestelli e rotori si spiegano nel sistema rotante con una gravità efficace intensa e diretta verso l'esterno; la RCF di una centrifuga è $\omega^2 r/g$.
- Sui corpi che si muovono nel sistema rotante agisce anche la forza di Coriolis, perpendicolare alla velocità; con rotazione antioraria devia verso destra, e se la velocità è perpendicolare all'asse vale $2mv\omega$.
- La Terra ruota con $\omega \approx 7{,}3 \times 10^{-5}$ rad/s: l'effetto centrifugo riduce g all'equatore di $0{,}034\ \text{m/s}^2$ (circa due terzi della differenza fra polo ed equatore, il resto è dovuto allo schiacciamento).
- Nell'emisfero nord i cicloni girano in verso antiorario e il piano del pendolo di Foucault ruota in verso orario; il verso dei vortici nei lavandini non dipende dalla rotazione terrestre.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Una forza apparente:
   - **A.** è esercitata dal sistema di riferimento sul corpo
   - **B.** compare solo nei sistemi non inerziali e non ha una reazione
   - **C.** compare anche nei sistemi inerziali, ma è trascurabile
   - **D.** è sempre diretta verso il centro di una rotazione

2. ● Un treno accelera in avanti con accelerazione A. Per un passeggero, la forza apparente su una valigia di massa m:

   A. vale mA ed è diretta all'indietro
   B. vale mA ed è diretta in avanti
   C. vale mg ed è diretta verso il basso
   D. è nulla, perché la valigia è ferma sul portabagagli

3. ● Un ascensore scende rallentando, prima di fermarsi al piano. La bilancia su cui sta una persona segna:

   A. meno del suo peso
   B. esattamente il suo peso
   C. zero
   D. più del suo peso

4. ● Il pendolino appeso allo specchietto di un'auto resta inclinato di 11° all'indietro rispetto alla verticale. L'auto:

   A. frena con decelerazione di circa 1,9 m/s^2
   B. accelera con circa 9,6 m/s^2
   C. accelera con circa 1,9 m/s^2
   D. accelera con circa 0,19 m/s^2

5. ●● Un pacco è fermo su una piattaforma che ruota. Se la velocità angolare raddoppia e il pacco resta fermo nella stessa posizione, la forza centrifuga su di esso:

   A. raddoppia
   B. quadruplica
   C. resta la stessa
   D. si dimezza

6. ● La forza di Coriolis agisce:

   A. su tutti i corpi di un sistema rotante, fermi o in moto
   B. solo sui corpi fermi in un sistema rotante
   C. anche nei sistemi inerziali, sui corpi molto veloci
   D. solo sui corpi che si muovono rispetto a un sistema rotante

7. ●● Visto dall'alto, un ciclone nell'emisfero nord ruota:

   A. in verso antiorario
   B. in verso orario
   C. in un verso che dipende dalla stagione
   D. in verso orario o antiorario a seconda della longitudine

8. ●● L'accelerazione di gravità misurata all'equatore è minore di quella misurata ai poli. La differenza:
   A. è dovuta interamente alla rotazione della Terra
   B. è dovuta interamente allo schiacciamento della Terra
   C. è dovuta in parte alla rotazione e in parte alla forma della Terra
   D. non esiste: g è uguale in tutti i punti della superficie

Vero o falso

9. ● Quando si studia dal suolo un'auto in curva, bisogna aggiungere alle altre forze la forza centrifuga. V / F

10. ● In un sistema di riferimento non inerziale un corpo può accelerare anche se la risultante delle forze vere su di esso è nulla. V / F

11. ●● Gli astronauti della Stazione Spaziale Internazionale galleggiano perché a quella quota la gravità terrestre è trascurabile. V / F

12. ●● La forza di Coriolis non compie lavoro. V / F

13. ●● Il verso in cui l'acqua gira nello scarico di un lavandino dipende dall'emisfero in cui ci si trova. V / F

Applicare

14. ● Un camion passa da fermo a 72 km/h in 25 s con accelerazione costante. Calcola la forza apparente che agisce su una cassa di 80 kg nel sistema del camion, e indicane il verso.

15. ● Completa. In un sistema che trasla con accelerazione $\boldsymbol{A}$, su un corpo di massa m agisce la forza apparente _____ ; il suo verso è _____ a quello di $\boldsymbol{A}$, e, poiché nessun corpo la esercita, _____ reazione.

16. ● Il filo di un pendolino appeso nella cabina di un furgone forma un angolo di 8,0° con la verticale, inclinato in avanti. Calcola l'accelerazione del furgone e dì se accelera o frena.

17. ●● Una ragazza di 50 kg sta su una bilancia in ascensore, che segna 44 kg. Calcola l'accelerazione della cabina (modulo e verso) e indica due moti dell'ascensore compatibili con la lettura.

18. ●● Un bambino di 30 kg è seduto su una giostra a 2,0 m dall'asse; la giostra gira con $\omega = 1{,}5$ rad/s. Nel sistema della giostra, quanto vale la forza centrifuga sul bambino? Quale coefficiente di attrito statico minimo fra bambino e sedile serve perché non scivoli, se non si tiene?

19. ●● Una centrifuga da laboratorio fa girare le provette a 12 000 giri/min, con il fondo a 8,0 cm dall'asse. Calcola la RCF.

20. ● Un astronauta di 70 kg è sulla Stazione Spaziale, dove l'accelerazione di gravità vale circa 8,7 m/s^2. Quanto vale il suo peso? Perché nella stazione galleggia?

21. ●● Leggi la Figura 3.3. a) Quanto vale l'accelerazione della cabina durante l'arresto? b) Che cosa segnerebbe una bilancia su cui sta una persona di 70 kg durante la partenza e durante l'arresto?

Problemi

22. ●● La lampada appesa al soffitto della carrozza di un treno, di massa 1,5 kg, forma durante una frenata un angolo di 4,0° con la verticale, inclinata in avanti. a) Calcola la decelerazione del treno. b) Se il treno viaggiava a 108 km/h e la decelerazione resta costante, in quanto spazio si ferma? c) Calcola la tensione del filo.

23. ●● In un ascensore un dinamometro regge un corpo di 2,0 kg e segna 22,6 N. a) Calcola l'accelerazione della cabina. b) Nello stesso istante, una pallina sfugge di mano a un passeggero a 1,20 m dal pavimento: quanto tempo impiega a toccare il pavimento?

24. ●●● Un piano inclinato liscio di 30° è fissato al pavimento di un ascensore che sale con accelerazione costante di 2,0 m/s^2. Un blocchetto, lasciato fermo in cima, scivola lungo il piano. a) Calcola la sua accelerazione rispetto al piano. b) Quanto tempo impiega a percorrere 1,0 m? c) Confronta con l'ascensore fermo. (Lavora nel sistema dell'ascensore; il piano inclinato liscio è in *Fisica 2*, capitolo 7.)

25. ●●● Un'auto percorre a 72 km/h una curva piana di raggio 60 m. a) Nel sistema dell'auto, quanto vale la forza centrifuga su un passeggero di 70 kg? b) Di che angolo si inclina, rispetto alla verticale, un pendolino appeso allo specchietto, e verso quale lato? c) Qual è il minimo coefficiente di attrito statico fra pneumatici e strada che permette di percorrere la curva? Risolvi il punto c) sia nel sistema dell'auto sia dal suolo.

26. ●● Un rotore ha raggio 3,0 m e il coefficiente di attrito statico fra le persone e la parete vale 0,45. Calcola, nel sistema del rotore, la velocità angolare minima perché il pavimento possa essere abbassato, e il periodo corrispondente.

27. ●●● Una stazione spaziale a forma di anello, di raggio 60 m, ruota per produrre una gravità artificiale di 9,8 m/s^2 sul pavimento. a) Calcola la velocità angolare e il periodo. b) Quanto vale la gravità efficace alla testa di un astronauta alto 1,8 m in piedi sul pavimento? c) Un astronauta di 70 kg cammina lungo l'anello a 1,2 m/s: calcola la forza di Coriolis su di lui e confrontala con il suo peso apparente.

28. ●●● Un proiettile viene sparato orizzontalmente a 800 m/s verso un bersaglio distante 800 m, alla latitudine di 45° nord. a) Calcola l'accelerazione di Coriolis orizzontale, $2v\omega \operatorname{sen} \varphi$. b) Stima di quanto il proiettile devia, e verso quale lato, considerando costante l'accelerazione di Coriolis e trascurando la resistenza dell'aria. c) Perché una deviazione così piccola conta nel tiro a grande distanza?

29. ●●● Una persona di 80 kg si pesa con un dinamometro di precisione al polo e all'equatore. a) Di quanto differiscono le due letture, usando i valori misurati di g (9,832 m/s^2 e 9,780 m/s^2)? b) Quanta parte della differenza si deve alla rotazione terrestre? c) Che cosa segnerebbe all'equatore se la Terra ruotasse così in fretta da rendere nulla la gravità efficace, e quanto durerebbe allora il giorno?

Ragionare e argomentare

30. ●● Un palloncino pieno di elio è legato con un filo al sedile di un'auto con i finestrini chiusi. Quando l'auto parte, il palloncino si sposta in avanti. Spiega perché, usando la gravità efficace e il principio di Archimede.

31. ●●● Trova l'errore. Per una persona di massa m in un ascensore che accelera verso l'alto con A, uno studente scrive dal suolo: «sulla persona agiscono il peso, la reazione della bilancia e la forza apparente $-mA$, quindi $N - mg - mA = mA$ e $N = m(g + 2A)$». Spiega l'errore e correggi il risultato.

32. ●● Stima di Fermi. Stima la forza di Coriolis su un'auto di 1200 kg che viaggia a 130 km/h in autostrada in Italia (latitudine circa 45°) e confrontala con il peso dell'auto e con la forza centripeta in una curva di raggio 500 m alla stessa velocità. Il guidatore deve preoccuparsene?

33. ●●● Sei chiuso in una stanza senza finestre, che potrebbe essere ferma, in moto rettilineo uniforme o in rotazione uniforme attorno a un asse verticale. Descrivi due esperimenti che ti permetterebbero di capire se la stanza ruota, e spiega perché nessun esperimento meccanico ti permette di distinguere la quiete dal moto rettilineo uniforme.

PER APPROFONDIRE

- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sulla relatività galileiana e sulle forze apparenti, con la discussione della forza di Coriolis sulla giostra.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i problemi sull'ascensore, sul moto circolare e sui sistemi accelerati, utili per esercitarsi nel confronto fra i due punti di vista.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: le pagine sulla gravità artificiale nelle stazioni spaziali rotanti e sulla «forza centrifuga», quasi senza formule.
- [NEW] I. Newton, *Principia*: lo scolio alle definizioni del primo libro, con l'esperimento del secchio e la distinzione fra moto assoluto e moto relativo.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: il racconto dell'ascensore in caduta libera e del legame fra inerzia e gravità.

Glossario del capitolo

Accelerazione di gravità efficace
$\boldsymbol{g}_{\text{eff}} = \boldsymbol{g} - \boldsymbol{A}$: l'accelerazione con cui cade un corpo lasciato libero in un sistema che trasla con accelerazione $\boldsymbol{A}$, misurata in quel sistema.

Accelerazione di trascinamento
Accelerazione $\boldsymbol{A}$ di un sistema di riferimento in moto traslatorio rispetto a un sistema inerziale: $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$.

Accelerometro
Strumento che misura l'accelerazione del sistema in cui si trova; un pendolo in un veicolo lo è ($\tan\theta = A/g$), e ne contiene uno ogni smartphone.

Anticiclone
Zona di alta pressione da cui l'aria defluisce, circolando in verso opposto a quello dei cicloni.

Centrifuga
Macchina che fa ruotare rapidamente dei contenitori per separare componenti di densità diversa.

Centrifugazione
Separazione dei componenti di un miscuglio per mezzo di una centrifuga, dove la gravità efficace, diretta verso l'esterno, è molto più intensa di g.

Ciclone
Vasta zona di bassa pressione atmosferica intorno a cui l'aria circola in verso antiorario nell'emisfero nord e orario in quello sud.

Ciclone tropicale
Ciclone molto intenso che si forma sui mari tropicali (uragano, tifone); non nasce quasi mai vicino all'equatore.

Forza centrifuga relativa
Rapporto $\omega^2 r/g$ (RCF), espresso come multiplo di g, che indica l'intensità di una centrifuga; è un numero puro.

Forza di Coriolis
Forza apparente che agisce sui corpi in moto rispetto a un sistema rotante, perpendicolare alla velocità; se la velocità è perpendicolare all'asse vale $2mv\omega$.

Gravità artificiale
Gravità efficace prodotta dalla forza centrifuga in una stazione spaziale che ruota.

Microgravità
Condizione di gravità efficace quasi nulla, come a bordo di una stazione spaziale in caduta libera intorno alla Terra.

Pendolo di Foucault
Pendolo molto lungo il cui piano di oscillazione ruota lentamente rispetto al suolo, dimostrando la rotazione della Terra (Parigi, 1851).

Schiacciamento polare
Lieve appiattimento della Terra ai poli, con un rigonfiamento all'equatore, dovuto alla rotazione.

Sistema di riferimento rotante
Sistema di riferimento che ruota rispetto a un sistema inerziale; non è inerziale, e i suoi punti hanno un'accelerazione centripeta che cresce con la distanza dall'asse.

Sistema in moto traslatorio
Sistema di riferimento che si muove senza ruotare rispetto a un sistema inerziale: tutti i suoi punti hanno in ogni istante la stessa accelerazione $\boldsymbol{A}$.

Verticale locale
La direzione del filo a piombo in un dato sistema di riferimento, cioè la direzione della gravità efficace.

Volo parabolico
Volo in cui un aereo segue la traiettoria di un proiettile, ottenendo nella cabina per una ventina di secondi una gravità efficace quasi nulla.

Soluzioni

1. B. È introdotta solo per descrivere i moti in un sistema non inerziale; nessun corpo la esercita, quindi non ha reazione.

2. A. $\boldsymbol{F}_{app} = -m\boldsymbol{A}$: modulo mA, verso opposto all'accelerazione del treno, cioè all'indietro.

3. D. La cabina scende e rallenta, quindi accelera verso l'alto ($A > 0$): la bilancia segna $m(g + A)$, più del peso.

4. C. $A = g \tan 11° = 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times 0{,}194 \approx 1{,}9\ \text{m/s}^2$; il filo inclinato all'indietro indica un'accelerazione in avanti.

5. B. $F_{cf} = m\omega^2 r$ è proporzionale a ω^2: raddoppiando ω quadruplica.

6. D. Su un corpo fermo nel sistema rotante agisce solo la forza centrifuga; la forza di Coriolis richiede una velocità relativa al sistema rotante.

7. A. L'aria diretta verso il centro di bassa pressione viene deviata verso destra e gira intorno al centro in verso antiorario.

8. C. La rotazione spiega circa $0{,}034\ \text{m/s}^2$ dei $0{,}052\ \text{m/s}^2$ di differenza; il resto dipende dallo schiacciamento.

9. F. Dal suolo, sistema inerziale, la forza centrifuga non esiste: la risultante delle forze vere è la forza centripeta.

10. V. Per esempio la bottiglietta sull'autobus che frena: risultante delle forze vere nulla, ma accelera rispetto all'autobus.

11. F. A 400 km la gravità vale circa $8{,}7\ \text{m/s}^2$; gli astronauti galleggiano perché sono in caduta libera insieme alla stazione.

12. V. È sempre perpendicolare alla velocità del corpo: cambia la direzione del moto, non il modulo della velocità.

13. F. Nel lavandino l'accelerazione di Coriolis è dell'ordine di $10^{-5}\ \text{m/s}^2$: il verso dipende dai moti residui dell'acqua e dalla forma del lavandino.

14. $A = (20\ \text{m/s})/(25\ \text{s}) = 0{,}80\ \text{m/s}^2$; $F_{app} = mA = 80\ \text{kg} \times 0{,}80\ \text{m/s}^2 = 64\ \text{N}$, diretta all'indietro.

15. $-m\boldsymbol{A}$; opposto; non ha.

16. $A = g \tan 8{,}0° = 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times 0{,}141 = 1{,}4\ \text{m/s}^2$. Il filo inclinato in avanti indica un'accelerazione all'indietro: il furgone frena.

17. La bilancia legge $N = 44\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 431\ \text{N}$. Nel sistema della cabina $N = m(g + A)$, quindi $A = N/m - g = 8{,}62\ \text{m/s}^2 - 9{,}8\ \text{m/s}^2 = -1{,}2\ \text{m/s}^2$: $1{,}2\ \text{m/s}^2$ verso il basso. Compatibili: la cabina parte verso il basso, oppure sale rallentando.

18. $F_{cf} = m\omega^2 r = 30\ \text{kg} \times (1{,}5\ \text{rad/s})^2 \times 2{,}0\ \text{m} = 135\ \text{N}$, verso l'esterno. Nel sistema della giostra il bambino è fermo: l'attrito statico deve equilibrarla, $\mu_s mg \geq 135\ \text{N}$, quindi $\mu_s \geq 135\ \text{N}/(30\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{m/s}^2) = 0{,}46$.

19. $\omega = 2\pi \times 200\ \text{s}^{-1} = 1257\ \text{rad/s}$; $\omega^2 r = (1257\ \text{rad/s})^2 \times 0{,}080\ \text{m} = 1{,}26 \times 10^5\ \text{m/s}^2$; $\text{RCF} = \omega^2 r/g \approx 1{,}3 \times 10^4$.

20. Peso: $70\ \text{kg} \times 8{,}7\ \text{m/s}^2 = 6{,}1 \times 10^2\ \text{N}$. Galleggia perché astronauta e stazione cadono insieme con la stessa accelerazione: nel sistema della stazione la forza apparente annulla il peso e la gravità efficace è (quasi) nulla.

21. a) Durante l'arresto la lettura è $9{,}0\ \text{m/s}^2$: $A = 9{,}0\ \text{m/s}^2 - 9{,}8\ \text{m/s}^2 = -0{,}8\ \text{m/s}^2$, cioè $0{,}8\ \text{m/s}^2$ verso il basso (la cabina sale rallentando). b) Partenza: $N = 70\ \text{kg} \times 10{,}6\ \text{m/s}^2 = 742\ \text{N}$, la bilancia mostra circa 76 kg; arresto: $N = 70\ \text{kg} \times 9{,}0\ \text{m/s}^2 = 630\ \text{N}$, circa 64 kg.

22. Sistema del treno. Sulla lampada agiscono il peso, la tensione e la forza apparente mA, diretta in avanti perché il treno frena; la lampada è ferma. a) Come per il pendolino: $\tan 4{,}0° = A/g$, $A = 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times 0{,}0699 = 0{,}685\ \text{m/s}^2$. b) $108\ \text{km/h} = 30\ \text{m/s}$; $d = v^2/(2A) = (30\ \text{m/s})^2/(2 \times 0{,}685\ \text{m/s}^2) \approx 6{,}6 \times 10^2\ \text{m}$. c) $T = m\sqrt{(g^2 + A^2)} = 1{,}5\ \text{kg} \times 9{,}82\ \text{m/s}^2 = 14{,}7\ \text{N}$.

23. Sistema della cabina. a) Sul corpo agiscono il peso, la forza del dinamometro e la forza apparente;

fermo: $F = m(g + A)$, quindi A = 22,6 N/2,0 kg − 9,8 m/s^2 = 1,5 m/s^2, verso l'alto. b) La pallina cade con $g_{eff} = g + A$ = 11,3 m/s^2: $t = \sqrt{(2 \times 1{,}20 \text{ m}/11{,}3 \text{ m/s}^2)}$ = 0,46 s.

24. Sistema dell'ascensore (non inerziale, traslante). Sul blocchetto agiscono il peso, la reazione normale del piano e la forza apparente mA verso il basso: insieme, peso e forza apparente equivalgono a una gravità efficace $g_{eff} = g + A$ = 11,8 m/s^2, verticale verso il basso. a) Come su un piano inclinato liscio con questa gravità: $a' = g_{eff}$ sen 30° = 5,9 m/s^2 lungo il piano; la reazione normale vale mg_{eff} cos 30°. b) $t = \sqrt{(2 \times 1{,}0 \text{ m}/5{,}9 \text{ m/s}^2)}$ = 0,58 s. c) Ad ascensore fermo $a' = g$ sen 30° = 4,9 m/s^2 e t = 0,64 s: in ascensore il blocchetto scende più in fretta.

25. 72 km/h = 20 m/s. a) Sistema dell'auto: $F_{cf} = mv^2/r$ = 70 kg × (20 m/s)^2/60 m = 467 N, verso l'esterno della curva. b) Nel sistema dell'auto la gravità efficace ha una componente orizzontale v^2/r = 6,67 m/s^2 verso l'esterno: tan θ = 6,67/9,8, θ = 34°, il pendolino si inclina verso l'esterno della curva. c) Sistema dell'auto: sull'auto agiscono peso, reazione normale, attrito statico verso il centro e forza centrifuga; l'auto è ferma, quindi l'attrito equilibra la forza centrifuga, $\mu_s mg \geq mv^2/r$. Dal suolo (inerziale): l'attrito statico è la forza centripeta, $F_s = mv^2/r \leq \mu_s mg$. In entrambi i casi $\mu_s \geq v^2/(gr)$ = 400/(9,8 × 60) = 0,68.

26. Sistema del rotore. Sulla persona agiscono peso, reazione della parete, attrito statico e forza centrifuga; è ferma: $N = m\omega^2 r$ e attrito = $mg \leq \mu_s N$. Quindi $\omega \geq \sqrt{(g/(\mu_s r))}$ = $\sqrt{(9{,}8/(0{,}45 \times 3{,}0))}$ rad/s = 2,7 rad/s; $T = 2\pi/\omega$ = 2,3 s (circa 26 giri/min).

27. Sistema rotante della stazione. a) Il pavimento è la parete esterna; la gravità artificiale è la forza centrifuga per unità di massa: $\omega^2 r = g$, $\omega = \sqrt{(9{,}8/60)}$ rad/s = 0,404 rad/s; $T = 2\pi/\omega$ = 15,5 s. b) La testa è a r = 58,2 m: $g_{eff} = \omega^2 \times 58{,}2$ m = 9,51 m/s^2, il 3% in meno che ai piedi. c) La velocità è perpendicolare all'asse, quindi $F_{Co} = 2mv\omega$ = 2 × 70 kg × 1,2 m/s × 0,404 rad/s = 68 N, circa il 10% del peso apparente (686 N): un effetto ben percepibile, che rende la camminata strana.

28. Sistema della Terra (rotante). a) a = 2 × 800 m/s × 7,29 × 10^{-5} rad/s × sen 45° = 0,083 m/s^2. b) Il volo dura 800 m/(800 m/s) = 1,0 s; la deviazione è circa $\frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 0{,}083 \text{ m/s}^2 \times (1{,}0 \text{ s})^2 \approx 4$ cm, verso destra (emisfero nord). c) La deviazione cresce con il quadrato del tempo di volo: per tiri che durano decine di secondi diventa di decine o centinaia di metri e va corretta.

29. Sistema della Terra. a) Il dinamometro segna mg_{eff}: 80 kg × (9,832 − 9,780) m/s^2 = 4,2 N in meno all'equatore. b) La rotazione dà $m\omega^2 R$ = 80 kg × 0,0339 m/s^2 = 2,7 N, circa due terzi; il resto dipende dallo schiacciamento. c) Zero: la forza centrifuga equilibrerebbe l'attrazione, $\omega^2 R$ = 9,81 m/s^2 (attrazione all'equatore senza effetto centrifugo, 9,780 + 0,034), cioè $\omega = \sqrt{(9{,}81/6{,}378 \times 10^6)}$ rad/s = 1,24 × 10^{-3} rad/s e un giorno di $2\pi/\omega \approx 5{,}1 \times 10^3$ s, circa 1,4 ore.

30. Traccia di risposta. Nel sistema dell'auto che accelera in avanti la gravità efficace è $\boldsymbol{g - A}$: ha una componente all'indietro. L'aria dell'abitacolo, come ogni fluido, si comporta come in un campo di gravità diretto così: la sua pressione cresce verso il retro dell'auto, come cresce verso il basso in un recipiente. La spinta di Archimede sul palloncino è opposta alla gravità efficace, quindi ha una componente in avanti, e poiché il palloncino è più leggero dell'aria che sposta, prevale: il palloncino si sposta in avanti, mentre i corpi più densi dell'aria (passeggeri, borse) vanno all'indietro.

31. Traccia di risposta. Lo studente lavora dal suolo, sistema inerziale, ma aggiunge una forza apparente, che lì non esiste; inoltre scrive a secondo membro l'accelerazione A misurata dal suolo. Così conta due volte l'effetto dell'accelerazione. Dal suolo: $N - mg = mA$; oppure nel sistema della cabina: $N - mg - mA = 0$ (la persona è ferma). In entrambi i casi $N = m(g + A)$.

32. Traccia di risposta. 130 km/h ≈ 36 m/s; $F_{Co} \approx 2mv\omega$ sen φ = 2 × 1200 kg × 36 m/s × 7,3 × 10^{-5} rad/s × 0,71 ≈ 4 N. Il peso vale circa 1,2 × 10^4 N, la forza centripeta nella curva $mv^2/r \approx 3{,}1 \times 10^3$ N: la forza di Coriolis è circa mille volte più piccola e del tutto compensata, senza accorgersene, da una minima correzione dello sterzo (o dall'inclinazione della strada). Il guidatore non deve preoccuparsene.

33. Traccia di risposta. Esperimenti per la rotazione: 1) un pendolo lasciato oscillare cambia lentamente il piano di oscillazione rispetto alle pareti (come il pendolo di Foucault); 2) un filo a piombo appeso lontano dall'asse si inclina verso l'esterno, tanto più quanto è lontano (forza centrifuga), e una biglia lasciata ferma sul pavimento liscio rotola verso l'esterno; 3) una biglia lanciata sul pavimento curva da un lato (forza di Coriolis); 4) l'acqua in una bacinella si alza verso il bordo, come nel secchio di Newton. Il moto rettilineo uniforme, invece, non si rivela: per il principio di relatività galileiana (capitolo 2) le leggi della meccanica hanno la stessa forma in tutti i sistemi inerziali, e ogni esperimento dà lo stesso risultato nella stanza ferma e in quella in moto uniforme. Accelerazioni e rotazioni si rivelano perché fanno comparire forze apparenti.