CAPITOLO

2

Il moto relativo e il principio di relatività galileiana

«Tutti i moti si comportano allo stesso modo in una nave, sia che essa stia ferma, sia che si muova uniformemente in linea retta.» — Isaac Newton, Principia, 1687 (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Descrivere lo stesso evento in due sistemi di riferimento in moto relativo uniforme e riconoscere l'ipotesi del tempo assoluto.
2. Ricavare e usare le trasformazioni di Galileo e le loro inverse, in forma vettoriale e per componenti.
3. Dimostrare la composizione delle velocità e l'invarianza dell'accelerazione, e applicarle a treni, fiumi e aerei.
4. Spiegare perché il secondo principio vale in tutti i sistemi inerziali ed enunciare il principio di relatività galileiana.
5. Analizzare il passo di Galileo sulla nave e distinguere ciò che il principio afferma da ciò che non afferma.
6. Distinguere le grandezze invarianti dalle grandezze relative e verificare in laboratorio la composizione delle velocità.

INDICE DEL CAPITOLO

2.1 Osservatori in moto relativo 2

2.2 Le trasformazioni di Galileo 3

2.3 Velocità e accelerazione in due sistemi inerziali 7

2.4 Il principio di relatività galileiana 11

2.5 Grandezze invarianti e grandezze relative 15

Fisica 3 · Parte I · Le leggi del moto e i sistemi di riferimento · versione 1.0
Capitolo 2: Il moto relativo e il principio di relatività galileiana · pagine 47–72 del volume completo · estratto per lo studio

Sei seduto in un treno fermo in stazione e guardi il treno sul binario accanto. A un tratto ti sembra di partire, poi ti accorgi che è l'altro treno a muoversi: per qualche secondo non hai saputo dire quale dei due fosse in moto. Questa piccola confusione contiene un'idea profonda: il moto si descrive sempre *rispetto a qualcosa*, e le leggi della meccanica non permettono di dire quale sistema di riferimento sia «davvero fermo».

Lo scorso anno hai usato la regola di composizione delle velocità (*Fisica 2*, capitolo 1) e hai definito i sistemi inerziali come quelli in cui vale il primo principio (*Fisica 2*, capitolo 4). Ora scriveremo le formule che traducono le misure di un osservatore in quelle di un altro, le *trasformazioni di Galileo*; da esse *dimostreremo* la regola delle velocità; vedremo quali grandezze cambiano da un sistema all'altro e quali no; e arriveremo al principio di relatività che Galileo formulò nel 1632 con l'immagine di una cabina chiusa sotto la coperta di una nave.

2.1 Osservatori in moto relativo

2.1.1 Due sistemi di riferimento

Chiameremo **osservatore** un sistema di riferimento insieme ai regoli e agli orologi fermi rispetto a esso: non serve una persona, serve qualcosa che registri posizioni e istanti. Un sistema di riferimento si dice **solidale** con un corpo quando è fermo rispetto a quel corpo e si muove con esso: gli assi disegnati sul pavimento di un vagone sono solidali con il treno, quelli tracciati lungo i binari sono solidali con il suolo.

In tutto il capitolo useremo due osservatori. Il primo, S, è fermo rispetto al suolo, che per gli esperimenti di pochi metri e pochi secondi è con ottima approssimazione un sistema inerziale. Il secondo, S′, è solidale con un veicolo, per esempio un treno, che si muove rispetto a S su un rettilineo con velocità costante $\boldsymbol{V}$. Le grandezze misurate in S′ si scrivono con l'apice: x', t', $\boldsymbol{v}'$. Per semplicità sceglieremo gli assi dei due sistemi paralleli fra loro, con l'asse x nella direzione di $\boldsymbol{V}$, e faremo coincidere le due origini O e O′ all'istante zero.

La velocità $\boldsymbol{V}$ con cui S′ si muove rispetto a S si chiama **velocità di trascinamento**: è la velocità che avrebbe, rispetto al suolo, un oggetto fermo sul treno, che il treno «trascina» con sé. Molti testi chiamano poi *assoluta* la velocità $\boldsymbol{v}$ misurata in S e *relativa* la velocità $\boldsymbol{v}'$ misurata in S′; noi eviteremo il primo aggettivo, perché, come vedremo, nessuna velocità è davvero assoluta.

2.1.2 Eventi e coordinate

Due osservatori confrontano più facilmente non dei corpi, ma dei fatti che accadono in un punto e in un istante: un lampo, una pallina che tocca il pavimento. Un fatto di questo tipo si chiama **evento**. Ogni osservatore gli attribuisce quattro numeri: tre coordinate spaziali e un istante, (x, y, z, t) per S e (x', y', z', t') per S′. L'evento è uno solo; le due quaterne di numeri sono due descrizioni diverse dello stesso evento.

Il moto di un corpo è una successione continua di eventi («il corpo è qui, in questo istante»): chi sa tradurre le coordinate di un evento sa tradurre anche traiettorie, velocità e accelerazioni.

2.1.3 Un'ipotesi sul tempo

I due osservatori misurano lo stesso tempo? L'esperienza dice di sì: il passeggero e il capostazione sincronizzano gli orologi alla partenza e all'arrivo li trovano ancora d'accordo. La meccanica di Galileo e di Newton fa di questa esperienza un'ipotesi generale: esiste un unico tempo, che scorre allo stesso modo per tutti gli osservatori, qualunque sia il loro moto. È l'ipotesi del **tempo assoluto**, che si scrive semplicemente

$$t = t'$$

Ne segue che due eventi contemporanei per un osservatore sono contemporanei anche per qualunque altro: la **simultaneità assoluta** è una conseguenza del tempo assoluto. E anche l'intervallo di tempo fra due eventi è lo stesso per tutti: $\Delta t = \Delta t'$. Sottolineiamo la parola *ipotesi*: nessuna esperienza a velocità ordinarie la contraddice, ma non è una verità logica, e all'inizio del Novecento, studiando velocità vicine a quella della luce, dovette essere abbandonata.

DA RICORDARE

Le ipotesi nascoste nelle trasformazioni di Galileo

Le formule del prossimo paragrafo si appoggiano su tre ipotesi. **1)** Il tempo è assoluto: $t = t'$. **2)** Le lunghezze sono assolute: un regolo misura la stessa lunghezza, che sia fermo o in moto. **3)** Il sistema S′ trasla rispetto a S con velocità $\boldsymbol{V}$ **costante**, senza ruotare. Se il treno accelera, frena o curva, l'accelerazione cambia da un sistema all'altro: è l'argomento del prossimo capitolo.

2.2 Le trasformazioni di Galileo

2.2.1 Dalla figura alle formule

Consideriamo un evento P: per esempio, una mosca si posa sul finestrino del treno in un certo istante t. Per S la sua posizione è il vettore $\boldsymbol{r}$, che va da O a P; per S′ è il vettore $\boldsymbol{r}'$, che va da O′ a P. All'istante t l'origine O′, partita da O all'istante zero con velocità costante $\boldsymbol{V}$, si è spostata di $\boldsymbol{V}t$.

La Figura 2.1 mostra che i tre vettori formano un triangolo: andare da O a P equivale ad andare prima da O a O′ e poi da O′ a P.

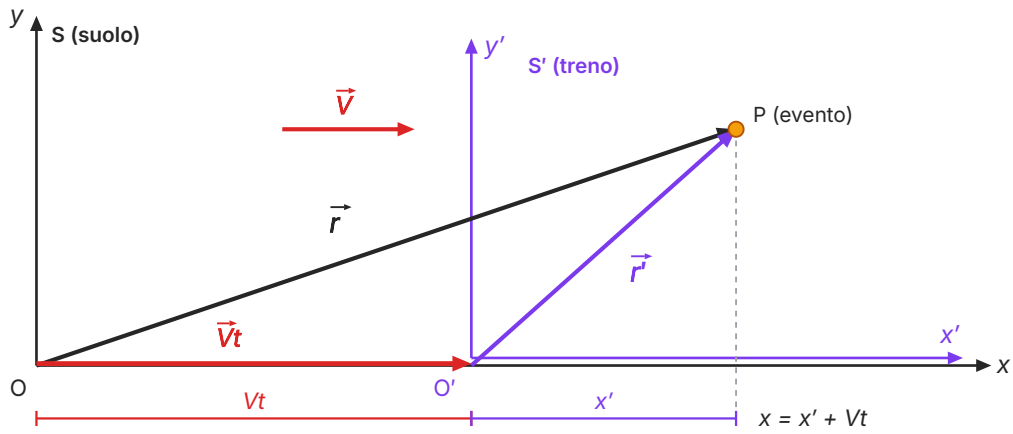


Figura 2.1 Lo stesso evento P visto da due sistemi di riferimento. Il sistema S′ (in viola) è solidale con un treno che si muove rispetto al suolo S con velocità costante V; le due origini coincidevano all'istante zero. All'istante t l'origine O′ si è spostata di Vt, e la posizione di P in S è la somma vettoriale $r = r' + Vt$. Lungo l'asse del moto: $x = x' + Vt$.

In forma vettoriale, dunque:

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}' + \boldsymbol{V}t \qquad t = t'$$

Con gli assi scelti come abbiamo detto, $\boldsymbol{V}$ ha soltanto la componente x, uguale a V. Scrivendo l'uguaglianza vettoriale per componenti otteniamo le **trasformazioni di Galileo**:

$$x = x' + Vt \qquad y = y' \qquad z = z' \qquad t = t'$$

Le coordinate perpendicolari al moto non cambiano: la mosca è alla stessa altezza dal binario per entrambi gli osservatori. Cambia soltanto la coordinata nella direzione del moto, e cambia di una quantità, Vt, che cresce con il passare del tempo.

2.2.2 Le trasformazioni inverse

Ricavando x' dalla prima equazione si ottengono le **trasformazioni inverse**, che traducono le misure di S in quelle di S′:

$$x' = x - Vt \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = t$$

Hanno la stessa forma delle trasformazioni dirette, con $-V$ al posto di V. Non è una coincidenza: per il passeggero è il suolo a muoversi all'indietro, con velocità $-\boldsymbol{V}$. Nessuno dei due sistemi ha un ruolo speciale, e le formule lo riflettono.

ESEMPIO SVOLTO

Il controllore sul treno

Problema. Un treno viaggia su un rettilineo a 90 km/h. Il sistema S′ ha l'origine nella porta posteriore del vagone, il sistema S è solidale con il binario; all'istante zero le due origini coincidono. A $t = 0$ il controllore si trova a 10 m dalla porta posteriore e cammina verso la parte anteriore del vagone a 1,5 m/s rispetto al treno, fino al bar, che è a 22 m dalla porta. a) In quale istante e in quale punto di S arriva al bar? b) Di quanto si è spostato in ciascuno dei due sistemi? c) Qual è la sua velocità rispetto al binario?

Soluzione. 90 km/h = 25 m/s. a) In S′ il controllore percorre 22 m − 10 m = 12 m a 1,5 m/s, quindi impiega $t' = 12\ \text{m} / 1{,}5\ \text{m/s} = 8{,}0\ \text{s}$. Per il tempo assoluto $t = t' = 8{,}0$ s. La posizione in S si ottiene con le trasformazioni di Galileo:

$$x = x' + Vt = 22\ \text{m} + 25\ \text{m/s} \times 8{,}0\ \text{s} = 222\ \text{m}$$

b) Nel sistema del treno lo spostamento è 12 m; rispetto al binario, invece, il controllore è passato da $x = 10$ m a $x = 222$ m: lo spostamento è 212 m. c) Rispetto al binario la velocità è $212\ \text{m} / 8{,}0\ \text{s} = 26{,}5\ \text{m/s}$, cioè 25 m/s + 1,5 m/s: la velocità del treno più quella del controllore rispetto al treno.

Controllo. Applichiamo le trasformazioni inverse all'evento finale: $x' = 222\ \text{m} - 25\ \text{m/s} \times 8{,}0\ \text{s} = 22$ m: proprio il bar.

2.2.3 La traiettoria dipende dal sistema

Le trasformazioni traducono anche intere traiettorie. Un passeggero, in un vagone che viaggia a velocità costante, lascia cadere una pallina da 1,8 m di altezza: lui la vede scendere in verticale ai suoi piedi, chi è sulla banchina la vede avanzare con il treno mentre cade (Figura 2.2). Ora possiamo dire quale curva vede quest'ultimo: un arco di parabola, come per il proiettile lanciato orizzontalmente (*Fisica 2*, capitolo 2).

ESEMPIO SVOLTO

Dal segmento verticale alla parabola

Problema. Ricava, con le trasformazioni di Galileo, l'equazione della traiettoria della pallina della Figura 2.2 nel sistema del suolo. Trascura la resistenza dell'aria.

1) Il moto nel sistema del vagone. Origine di S′ sul pavimento, sotto la mano, asse y' verso l'alto. La pallina parte da ferma dalla quota h:

$$x' = 0 \qquad y' = h - \tfrac{1}{2}gt'^2$$

2) La traduzione nel sistema del suolo. Le origini coincidono a $t = 0$, quando la pallina viene lasciata. Applichiamo $x = x' + Vt$, $y = y'$, $t = t'$:

$$x = Vt \qquad y = h - \tfrac{1}{2}gt^2$$

Sono le leggi orarie di un proiettile lanciato orizzontalmente con velocità V: per chi sta a terra, la pallina parte con la velocità del treno.

3) L'equazione della traiettoria. Dalla prima legge $t = x/V$; sostituendo nella seconda si ottiene una parabola con il vertice nel punto di partenza e la concavità verso il basso:

$$y = h - \frac{g}{2V^2}x^2$$

4) I numeri. Con $h = 1{,}8$ m e $V = 4{,}0$ m/s la caduta dura $t = \sqrt{(2h/g)} = \sqrt{(2 \times 1{,}8\ \text{m} / 9{,}8\ \text{m/s}^2)} = 0{,}61$ s in entrambi i sistemi. In S′ la pallina arriva in $x' = 0$, in S in $x = 4{,}0\ \text{m/s} \times 0{,}61\ \text{s} = 2{,}4$ m; ma anche il passeggero è avanzato di 2,4 m. I due osservatori concordano sul punto d'arrivo, ai piedi del passeggero, e discordano soltanto sulla curva.

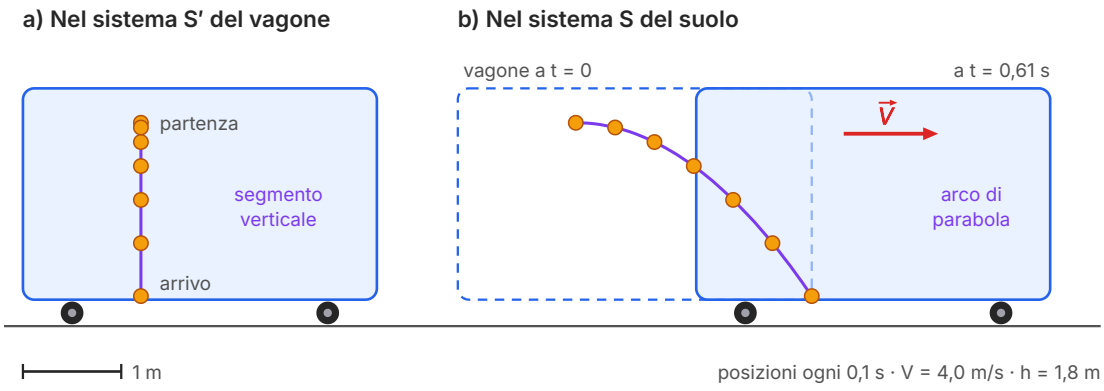


Figura 2.2 Una pallina lasciata cadere da ferma, rispetto al vagone, da 1,8 m di altezza (posizioni calcolate ogni 0,1 s). a) Nel sistema S′ del vagone la traiettoria è un segmento verticale. b) Nel sistema S del suolo è un arco di parabola: in 0,61 s di caduta vagone e pallina avanzano insieme di 2,4 m. Stessa scala nei due pannelli.

2.3 Velocità e accelerazione in due sistemi inerziali

2.3.1 La composizione delle velocità, dimostrata

Scriviamo la trasformazione di Galileo per due posizioni successive di un corpo, separate da un intervallo Δt, e sottraiamo membro a membro: siccome $\boldsymbol{V}$ è costante, la differenza di $\boldsymbol{V}t$ fra i due istanti è $\boldsymbol{V}\Delta t$, e quindi

$$\Delta \boldsymbol{r} = \Delta \boldsymbol{r}' + \boldsymbol{V}\Delta t$$

È ciò che abbiamo trovato per il controllore: 212 m = 12 m + 200 m. Dividiamo ora per l'intervallo di tempo, che è lo stesso nei due sistemi, $\Delta t = \Delta t'$:

$$\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}'}{\Delta t'} + \boldsymbol{V}$$

L'uguaglianza fra le velocità medie vale per qualunque intervallo; facendo tendere Δt a zero (capitolo precedente) si ottiene la **legge di composizione galileiana delle velocità**:

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$$

È la stessa regola di composizione delle velocità che hai usato nel volume dello scorso anno. Allora era una regola giustificata con esempi; ora è un teorema, che dipende dalle ipotesi delle trasformazioni: per dividere per lo stesso Δt abbiamo usato il tempo assoluto.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> «Le velocità si sommano, quindi i moduli si sommano»: **falso**, in generale. La composizione $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$ è una somma di **vettori**. Un passeggero che cammina a 1,5 m/s su un treno a 25 m/s si muove, rispetto al binario, a 26,5 m/s se va verso la testa del treno, a 23,5 m/s se va verso la coda e a $\sqrt{(25^2 + 1{,}5^2)}$ m/s $\approx$ 25,04 m/s se attraversa il corridoio perpendicolarmente al binario.

2.3.2 Fiumi e vento laterale, rivisti

In un fiume, S′ è solidale con l'acqua e $\boldsymbol{V}$ è la velocità della corrente; la barca ha velocità $\boldsymbol{v}'$ rispetto all'acqua e $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$ rispetto alla riva. Per un aereo, S′ è solidale con la massa d'aria e $\boldsymbol{V}$ è la velocità del vento: il pilota sceglie la direzione in cui puntare il muso, cioè $\boldsymbol{v}'$, in modo che la somma $\boldsymbol{v}$ punti verso la destinazione (Figura 2.3).

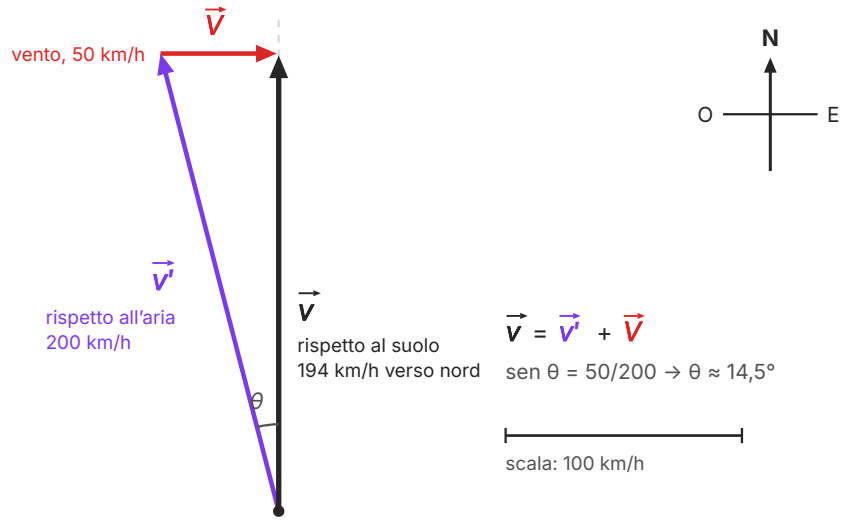


Figura 2.3 Un aereo vola verso nord con vento da ovest. La velocità rispetto all'aria v' (200 km/h) e la velocità del vento V (50 km/h) si sommano nella velocità rispetto al suolo v, che deve puntare verso nord: il pilota punta il muso a ovest del nord di un angolo θ con sen θ = 50/200, cioè θ ≈ 14,5°. Le frecce sono in scala.

ESEMPIO SVOLTO

Volare verso nord con vento al traverso

Problema. Un piccolo aereo deve raggiungere una città che si trova 300 km esattamente a nord. La sua velocità rispetto all'aria è 200 km/h; soffia un vento da ovest (cioè diretto verso est) di 50 km/h. a) In quale direzione il pilota deve puntare l'aereo? b) Qual è la velocità rispetto al suolo e quanto dura il volo? c) Che cosa accadrebbe se il pilota puntasse semplicemente verso nord?

Soluzione. Scegliamo l'asse x verso est e l'asse y verso nord. S è il suolo, S′ è la massa d'aria, che si muove rispetto al suolo con $\boldsymbol{V} = (50\ \text{km/h};\ 0)$. a) La velocità rispetto al suolo deve essere diretta verso nord: $v_x = 0$. Per componenti, $v_x = v'_x + V_x$, quindi $v'_x = -50$ km/h. Se θ è l'angolo fra il muso e il nord, $v'_x = -v' \operatorname{sen}\theta$, da cui

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{50\ \text{km/h}}{200\ \text{km/h}} = 0{,}25 \quad \Longrightarrow \quad \theta \approx 14{,}5^\circ \text{ a ovest del nord}$$

b) La componente verso nord è tutta dovuta all'aereo: $v = v_y = v' \cos\theta = \sqrt{(200^2 - 50^2)}$ km/h ≈ 194 km/h. Il volo dura 300 km / 194 km/h ≈ 1,55 h, circa 1 h 33 min. c) Puntando verso nord, l'aereo arriverebbe all'altezza della città dopo 300 km / 200 km/h = 1,5 h, ma nel frattempo il vento lo avrebbe portato 50 km/h × 1,5 h = 75 km a est.

Controllo. Il triangolo della Figura 2.3 è rettangolo: $194^2 + 50^2 \approx 200^2$.

2.3.3 L'accelerazione è invariante

Scriviamo la composizione delle velocità all'inizio e alla fine di un intervallo Δt; sottraendo le due uguaglianze, $\boldsymbol{V}$ scompare, perché è costante:

$$\Delta \boldsymbol{v} = \Delta \boldsymbol{v}' \quad \Longrightarrow \quad \boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$$

Le variazioni di velocità sono le stesse nei due sistemi e avvengono negli stessi intervalli di tempo: quindi anche le accelerazioni sono uguali. È l'**invarianza dell'accelerazione**.

Attenzione alla condizione: il risultato vale perché $\boldsymbol{V}$ è costante. Se S′ accelerasse con accelerazione $\boldsymbol{A}$, nella differenza resterebbe $\Delta \boldsymbol{V}$, e si troverebbe $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$. È ciò che accade in un treno che frena, e sarà il punto di partenza del prossimo capitolo.

ESEMPIO SVOLTO

Lo stesso ciclista, due tabelle

Problema. Un ciclista parte su una strada rettilinea e la sua posizione viene registrata ogni secondo da due osservatori: uno fermo sul marciapiede (S) e uno su un'auto che procede nello stesso verso a velocità costante (S′); all'istante zero entrambi si trovano accanto al ciclista. I dati sono nella Tabella 2.1 e nel grafico della Figura 2.4. Ricava da ciascuna serie di dati la velocità dell'auto e l'accelerazione del ciclista.

Tabella 2.1 Posizioni del ciclista misurate dal marciapiede (x) e dall'auto (x'), con le velocità medie calcolate su ciascun intervallo di 1 s.

t (s)	x (m)	x' (m)	intervallo	v_m (m/s)	v'_m (m/s)
0	0,0	0,0	0–1 s	3,6	−4,4
1	3,6	−4,4	1–2 s	4,8	−3,2
2	8,4	−7,6	2–3 s	6,0	−2,0
3	14,4	−9,6	3–4 s	7,2	−0,8
4	21,6	−10,4	4–5 s	8,4	0,4
5	30,0	−10,0	—	—	—

Soluzione. 1) In ogni istante $x - x' = Vt$: a $t = 1$ s la differenza è 3,6 m − (−4,4 m) = 8,0 m, a $t = 3$ s è 14,4 m − (−9,6 m) = 24,0 m, a $t = 5$ s è 40,0 m. La differenza cresce di 8,0 m al secondo: l'auto viaggia a $V = 8{,}0$ m/s.

2) Le velocità medie si ottengono dividendo ogni spostamento per 1 s. Per il marciapiede valgono 3,6; 4,8; 6,0; 7,2; 8,4 m/s; per l'auto −4,4; −3,2; −2,0; −0,8; +0,4 m/s. In ogni intervallo $v_m - v'_m = 8{,}0$ m/s: è la composizione delle velocità.

3) In entrambe le colonne la velocità media aumenta di 1,2 m/s a ogni secondo: l'accelerazione è $a = a' = 1{,}2$ m/s^2. Nel grafico le pendenze sono diverse, ma le curve si incurvano allo stesso modo: differiscono per la retta Vt, che non ha curvatura.

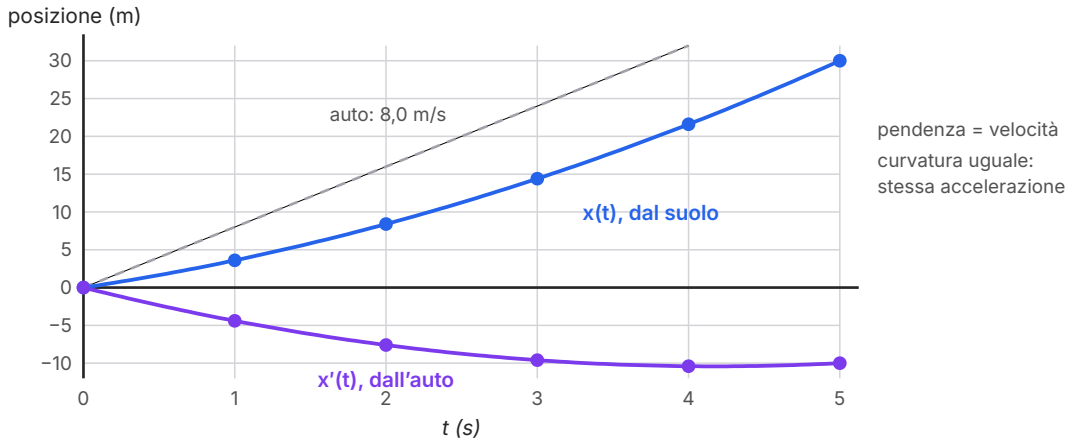


Figura 2.4 Grafici posizione-tempo del ciclista della Tabella 2.1, $x(t) = (3{,}0\ \text{m/s})t + (0{,}60\ \text{m/s}^2)t^2$, misurato dal marciapiede (in blu) e da un'auto che viaggia a 8,0 m/s (in viola; la retta tratteggiata è il moto dell'auto rispetto al marciapiede). In ogni istante la distanza verticale fra la curva blu e quella viola è Vt.

2.3.4 Il secondo principio vale in ogni sistema inerziale

Supponiamo che in S, inerziale, valga $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$. Vale anche in S′? Le forze che conosci dipendono da grandezze che i due osservatori misurano allo stesso modo: la forza elastica dall'allungamento della molla, una differenza di posizioni nello stesso istante; il peso da m e g; l'attrito dalla forza normale e dalla velocità *relativa* delle superfici, una differenza di velocità in cui $\boldsymbol{V}$ si cancella. E la massa è la stessa per tutti. Dunque la forza $\boldsymbol{F}$ e la massa m sono le stesse in S e in S′; poiché anche $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$, in S′ si ha

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}'$$

Il secondo principio vale anche in S′, con le stesse forze e le stesse masse. Lo stesso accade al primo principio (se $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{0}$, allora $\boldsymbol{a}' = \boldsymbol{0}$) e al terzo, che riguarda soltanto le forze. Abbiamo così dimostrato ciò che lo scorso anno era solo affermato: **ogni sistema che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema inerziale è anch'esso inerziale**. I sistemi inerziali non sono uno solo, ma infiniti, uno per ogni velocità costante; e, per le leggi della dinamica, sono tutti equivalenti.

2.4 Il principio di relatività galileiana

2.4.1 L'enunciato

Poiché tutta la meccanica si costruisce sui tre principi, possiamo enunciare il **principio di relatività galileiana**:

le leggi della meccanica hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

Un modo equivalente di dirlo è operativo: **nessun esperimento di meccanica, eseguito all'interno di un sistema inerziale, permette di stabilire se quel sistema è fermo o si muove di moto rettilineo uniforme.** Se le leggi sono le stesse, ogni esperimento ha lo stesso esito in tutti i sistemi inerziali. Il principio afferma così l'**equivalenza dei sistemi inerziali**: non esiste, per la meccanica, un **sistema di riferimento privilegiato**, «il vero sistema fermo» rispetto al quale misurare velocità assolute.

2.4.2 La nave di Galileo

Galileo non usò formule per dire tutto questo. Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632), discutendo con l'aristotelico Simplicio gli argomenti contro il moto della Terra, il portavoce di Galileo, Salviati, propone un esperimento che chiunque può fare. Nel primo volume ne hai letto un riassunto in italiano moderno; ecco l'inizio del testo originale (Giornata seconda):

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

Fatte queste osservazioni a nave ferma, Salviati chiede di far muovere la nave «con quanta si voglia velocità; chè (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma». Le gocce cadono nel vaso «senza caderne pur una verso poppa», e le farfalle non si ammucchiano contro la parete di poppa (Figura 2.5).

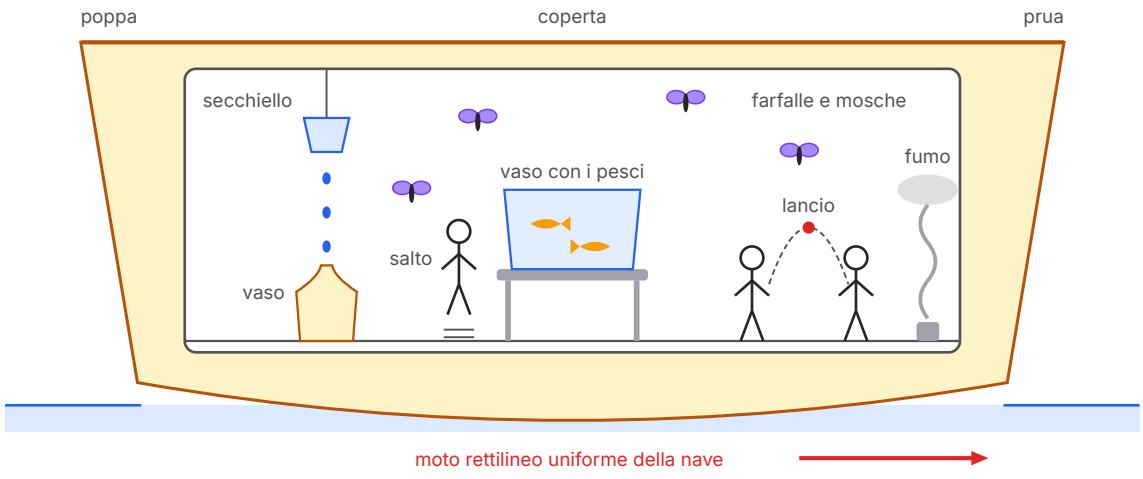


Figura 2.5 Schema della cabina descritta da Galileo nel *Dialogo*: il secchiello che gocciola in un vaso dalla bocca stretta, il vaso con i pesci, gli insetti in volo, il fumo dell'incenso, chi salta e chi lancia un oggetto all'amico. Se la nave si muove di moto rettilineo uniforme, ogni fenomeno si svolge esattamente come a nave ferma.

Rileggiamo il passo. **1)** La cabina è un sistema S′ in moto con velocità $\boldsymbol{V}$ costante rispetto alla riva: «pur che il moto sia uniforme e non fluttuante» è l'ipotesi delle trasformazioni di Galileo. **2)** Gli amici stanno «sotto coverta», senza finestre: guardare la riva non è un esperimento fatto *dentro* il sistema. **3)** Le gocce, il salto e il lancio sono governati dal peso e dalla spinta iniziale; pesci e farfalle si muovono nell'acqua e nell'aria, trascinate dalla nave: per il principio di relatività ogni effetto è lo stesso a nave ferma e in moto. **4)** Per chi sta a riva una goccia cade lungo un arco di parabola, mentre il vaso avanza della stessa quantità. È la situazione della Figura 2.2: i due osservatori descrivono traiettorie diverse, ma concordano sul fatto che la goccia finisce nel vaso.

Galileo stesso spiega la ragione di questa «corrispondenza d'effetti»: il moto della nave è «comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora». Un moto comune a tutto ciò che si osserva non si osserva: conta soltanto il moto delle cose le une rispetto alle altre.

COLLEGAMENTI

Un caffè a 900 km/h

Un aereo di linea in crociera vola a circa 900 km/h, cioè 250 m/s, rispetto al suolo. Eppure in cabina l'assistente versa il caffè nella tazzina esattamente come al bar, un passeggero lancia una caramella al vicino senza «mirare in avanti», e un bambino che salta nel corridoio ricade nello stesso punto.

Le cose cambiano quando cambia la velocità: al decollo ci si sente spinti contro lo schienale, in virata il liquido si inclina nel bicchiere, nelle turbolenze il carrello delle bevande sobbalza. Per questo il segnale delle cinture si accende al decollo, all'atterraggio e nelle turbolenze: in quei momenti l'aereo non è un sistema inerziale.

2.4.3 Che cosa il principio non dice

Conviene non far dire al principio più di quanto dice. **Non dice che ogni moto è impossibile da rivelare.** Riguarda il moto rettilineo uniforme. Un'accelerazione si sente: in un treno che frena una pallina comincia a rotolare in avanti e un pendolo si inclina; anche la nave di Galileo, se il mare la fa beccheggiare, rivela il suo moto.

Non dice che tutte le grandezze sono relative. Le velocità, le posizioni e le traiettorie cambiano da un sistema inerziale all'altro; le accelerazioni, le forze, le masse e gli intervalli di tempo no. Il principio riguarda la *forma delle leggi*: in tutti i sistemi inerziali vale $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$, anche se il valore della velocità di un corpo è diverso per ciascuno. E **non dice nulla, da solo, sui fenomeni non meccanici**: se valga anche per la luce e per l'elettromagnetismo fu, alla fine dell'Ottocento, una domanda aperta, che studierai negli anni successivi.

ERRORE FREQUENTE

«Se sono su un treno e salto verso l'alto, il treno avanza sotto di me e io ricado più indietro»: **falso**, se il treno viaggia a velocità costante. Al momento del salto hai già la velocità orizzontale del treno e la conservi mentre sei in aria, perché nessuna forza orizzontale agisce su di te: per chi è sulla banchina tu e il punto del pavimento da cui sei partito avanzate della stessa quantità. Nel sistema del treno, che è inerziale, il salto è identico a quello che faresti sul marciapiede. Ricadresti più indietro soltanto se, mentre sei in aria, il treno accelerasse; più avanti, se frenasse.

APPROFONDIMENTO

La pietra dalla torre e il moto della Terra

Contro il moto della Terra gli aristotelici portavano l'**argomento della torre**: se la Terra ruotasse verso oriente, una pietra lasciata cadere da una torre dovrebbe toccare terra spostata verso occidente, perché intanto la torre avanzerebbe; invece cade al piede della torre, dunque la Terra è ferma. Lo sostenevano con un'esperienza che credevano nota: dall'albero di una nave in moto, si diceva, una pietra cade verso poppa.

Nella Giornata seconda del *Dialogo* Salviati ribatte che la pietra cade sempre al piede dell'albero, ferma o in moto che sia la nave, e conclude: «Onde, per esser la medesima ragione della Terra che della nave, dal cader la pietra sempre a perpendicolo al piè della torre non si può inferir nulla del moto o della quiete della Terra». Simplicio gli fa notare che nemmeno lui ha mai fatto la prova, e Salviati risponde: «Io senza esperienza son sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perchè così è necessario che segua». La pietra condivide il moto della torre, e un moto comune non lascia tracce.

L'analogia vale però solo in prima approssimazione: la Terra non trasla in linea retta, ma ruota, e una pietra che cade da una torre molto alta tocca terra spostata di pochi centimetri, verso *oriente*; lo spiegheremo con i sistemi non inerziali, nel prossimo capitolo.

Nei *Principia* (1687) Newton fece dell'osservazione di Galileo un corollario delle sue leggi: «*Corporum dato spatio inclusorum ijdem sunt motus inter se, sive spatium illud quiescat, sive moveatur idem uniformiter in directum absque motu circulari*», cioè «I moti dei corpi racchiusi in uno spazio dato sono gli stessi fra loro, sia che quello spazio stia fermo, sia che si muova uniformemente in linea retta senza moto circolare» (Corollario V; traduzione della redazione; nella stampa del 1687 *absque* è abbreviato). Eppure Newton credeva nell'esistenza di uno **spazio assoluto**, immobile e indipendente dai corpi, pur sapendo che il moto uniforme rispetto a esso non si può rivelare.

Un'avvertenza: a velocità vicine a quella della luce le trasformazioni di Galileo smettono di funzionare e vanno sostituite da altre, che non conservano il tempo assoluto; lo vedrai al quinto anno.

2.5 Grandezze invarianti e grandezze relative

2.5.1 Che cosa non cambia

Una grandezza che ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali si dice **grandezza invariante**; una grandezza il cui valore dipende dal sistema si dice **grandezza relativa**.

Sono invarianti gli **intervalli di tempo**, per l'ipotesi del tempo assoluto, e le **lunghezze**, purché le posizioni dei due estremi siano lette nello stesso istante. La porta del vagone del controllore ($x' = 0$) e il bar ($x' = 22$ m) si trovano per chi sta a terra, all'istante t, in $x = Vt$ e $x = 22\text{ m} + Vt$:

la differenza è 22 m. Leggendo il bar un secondo dopo la porta si troverebbe 47 m: non una lunghezza, ma un errore di misura. Sono invarianti anche, come abbiamo visto, le **differenze di velocità**, le **accelerazioni**, le **masse** e le **forze**.

Soprattutto sono invarianti le **leggi**: è il contenuto del principio di relatività. Ma una legge può valere in tutti i sistemi anche se contiene grandezze relative, purché ciascun osservatore usi i propri valori.

2.5.2 Che cosa cambia

Sono relative le **posizioni**; le **velocità**, che differiscono di $\boldsymbol{V}$; gli **spostamenti** in un intervallo di tempo, che differiscono di $\boldsymbol{V}\Delta t$; le **traiettorie**, come la parabola che per un altro osservatore è un segmento. E le grandezze che se ne ricavano: l'energia cinetica, $\frac{1}{2}mv^2$, e il lavoro, che dipende dallo spostamento. Una valigia sul portabagagli ha energia cinetica nulla per il passeggero, ma non per il capostazione. Non c'è contraddizione, come mostra l'esempio.

ESEMPIO SVOLTO

Energia cinetica e lavoro in due sistemi

Problema. Su una rotaia a cuscino d'aria, senza attrito, un carrello di 2,0 kg si muove a 1,0 m/s. Per 3,0 s un filo lo tira in avanti con una forza costante di 4,0 N, parallela alla rotaia. Calcola le energie cinetiche iniziale e finale, la loro variazione e il lavoro della forza: a) nel sistema S del laboratorio; b) in un sistema S′ che si muove rispetto al laboratorio, nello stesso verso, a 3,0 m/s costanti.

Soluzione. Peso e spinta del cuscino d'aria si equilibrano; la risultante è la forza del filo. L'accelerazione è $a = F/m = 4{,}0\ \text{N} / 2{,}0\ \text{kg} = 2{,}0\ \text{m/s}^2$, la stessa nei due sistemi.

a) In S: $v_\text{f} = 1{,}0\ \text{m/s} + 2{,}0\ \text{m/s}^2 \times 3{,}0\ \text{s} = 7{,}0\ \text{m/s}$. Lo spostamento è $\Delta x = 1{,}0\ \text{m/s} \times 3{,}0\ \text{s} + \frac{1}{2} \times 2{,}0\ \text{m/s}^2 \times (3{,}0\ \text{s})^2 = 12\ \text{m}$. $K_\text{i} = \frac{1}{2} \times 2{,}0\ \text{kg} \times (1{,}0\ \text{m/s})^2 = 1{,}0\ \text{J}$; $K_\text{f} = \frac{1}{2} \times 2{,}0\ \text{kg} \times (7{,}0\ \text{m/s})^2 = 49\ \text{J}$; $\Delta K = 48\ \text{J}$. Il lavoro è $W = F\Delta x = 4{,}0\ \text{N} \times 12\ \text{m} = 48\ \text{J}$.

b) In S′ le velocità diminuiscono di 3,0 m/s: $v'_\text{i} = -2{,}0\ \text{m/s}$ e $v'_\text{f} = 4{,}0\ \text{m/s}$. Lo spostamento diminuisce di $V\Delta t = 9{,}0\ \text{m}$: $\Delta x' = 3{,}0\ \text{m}$. $K'_\text{i} = \frac{1}{2} \times 2{,}0\ \text{kg} \times (2{,}0\ \text{m/s})^2 = 4{,}0\ \text{J}$; $K'_\text{f} = \frac{1}{2} \times 2{,}0\ \text{kg} \times (4{,}0\ \text{m/s})^2 = 16\ \text{J}$; $\Delta K' = 12\ \text{J}$. Il lavoro è $W' = 4{,}0\ \text{N} \times 3{,}0\ \text{m} = 12\ \text{J}$.

Commento. Energie cinetiche, variazioni e lavori sono diversi: sono grandezze relative. Ma per entrambi il lavoro è uguale alla variazione dell'energia cinetica: il teorema dell'energia cinetica (*Fisica 2*, capitolo 9) vale in entrambi i sistemi, come richiede il principio di relatività. Relativi sono i valori, non la legge.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: una pallina lanciata da un carrello in moto

Materiali. Un carrello su una rotaia a basso attrito, con un lanciatore a molla che spara una pallina verticalmente verso l'alto rispetto al carrello; due fotocellule poste a (0,500 ± 0,001) m l'una dall'altra, collegate a un cronometro (risoluzione 1 ms); uno smartphone che riprende a 60 fotogrammi al secondo, fisso su un treppiede, con un righello nell'inquadratura; un programma di analisi video.

Procedimento. 1) Dai al carrello una spinta e lascialo correre sulla rotaia: con le fotocellule misura il tempo che impiega a percorrere i 50 cm, Δt = (0,806 ± 0,002) s, e calcola la sua velocità, V = (0,620 ± 0,003) m/s. 2) Ripeti la corsa con la stessa spinta, attivando il lanciatore fra le fotocellule, e riprendi il volo da terra, con la camera perpendicolare alla rotaia. 3) Con l'analisi video ricava (x, y) della pallina ogni 0,05 s, con l'origine nel lanciatore all'istante del lancio, e calcola $x' = x - Vt$, la coordinata nel sistema del carrello.

Tabella 2.2 Posizioni della pallina misurate da terra (dati tipici). Incertezza di lettura sulle coordinate ±0,2 cm. L'ultima colonna è la coordinata orizzontale nel sistema del carrello, calcolata con V = 0,620 m/s.

t (s)	x (cm)	y (cm)	$x' = x - Vt$ (cm)
0,00	0,0	0,0	0,0
0,05	3,2	10,7	+0,1
0,10	6,1	19,1	−0,1
0,15	9,2	25,0	−0,1
0,20	12,5	28,0	+0,1
0,25	15,4	29,4	−0,1
0,30	18,7	27,8	+0,1
0,35	21,6	23,9	−0,1
0,40	24,9	17,6	+0,1
0,45	27,8	8,9	−0,1

Che cosa concludere. Da terra la traiettoria è un arco di parabola: x cresce di circa 3,1 cm ogni 0,05 s, y sale fino a circa 29 cm e ridiscende. Nel sistema del carrello x' resta fra −0,1 cm e +0,1 cm, nulla entro l'incertezza: la pallina sale e scende in verticale e ricade nel carrello. **Confronto teoria–esperimento.** La teoria prevede che la componente orizzontale della velocità della pallina, da terra, sia uguale alla velocità del carrello: $v_x = V$ = (0,620 ± 0,003) m/s. La retta dei minimi quadrati che approssima i dati (t; x) ha pendenza v_x = (0,619 ± 0,002) m/s. La differenza

fra le due misure, 0,001 m/s, è minore della somma delle incertezze, 0,005 m/s: le due misure sono compatibili, come richiesto dalla composizione delle velocità ($v'_x = 0$ nel sistema del carrello).

Sicurezza. Non guardare dentro il lanciatore carico e non puntarlo verso i compagni; ferma il carrello a fine rotaia con un respingente.

Per la relazione. Riporta la tabella e il grafico di y in funzione di x (la traiettoria vista da terra) accanto a quello di y in funzione di x' (vista dal carrello). Mostra come hai ricavato la pendenza e la sua incertezza e discuti il confronto. Chiediti infine che cosa vedresti se il carrello rallentasse durante il volo per effetto dell'attrito: dove ricadrebbe la pallina rispetto al lanciatore?

Tabella 2.3 Grandezze invarianti e grandezze relative nel passaggio da un sistema inerziale a un altro che si muove rispetto al primo con velocità costante V (trasformazioni di Galileo).

Grandezza	Invariante o relativa	Come si passa da S′ a S
istante, intervallo di tempo	invariante	$t = t'$ (ipotesi del tempo assoluto)
lunghezza, distanza fra due punti nello stesso istante	invariante	le due posizioni cambiano della stessa quantità Vt
posizione	relativa	$r = r' + Vt$
spostamento in un intervallo Δt	relativo	$\Delta r = \Delta r' + V\Delta t$
traiettoria	relativa	per esempio, segmento verticale in S′, parabola in S
velocità	relativa	$v = v' + V$
accelerazione	invariante	$a = a'$ (solo se V è costante)
massa, forza	invarianti	le forze dipendono da distanze e velocità relative, che non cambiano
energia cinetica, lavoro	relativi	dipendono da velocità e spostamenti; il teorema $W = \Delta K$ vale in ogni sistema
leggi della meccanica	invarianti	principio di relatività galileiana

La Tabella 2.3 riassume il quadro. Le grandezze invarianti sono proprio i «mattoni» della seconda legge, accelerazioni, forze e masse: per questo la legge vale in tutti i sistemi inerziali.

IN SINTESI

Le formule del capitolo

$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}' + \boldsymbol{V}t$; $t = t'$ — trasformazioni di Galileo in forma vettoriale (posizioni in m), con $\boldsymbol{V}$ costante e origini coincidenti a $t = 0$; valgono per velocità molto minori di quella della luce.

$x = x' + Vt$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$ — per componenti, con l'asse x parallelo a $\boldsymbol{V}$; le inverse si ottengono con $-V$ al posto di V.

$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$ — composizione delle velocità (m/s): somma **vettoriale**.

$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$ — l'accelerazione (m/s^2) è invariante fra sistemi in moto relativo **uniforme**; con masse e forze invarianti, $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ vale in tutti i sistemi inerziali.

Principio di relatività galileiana — le leggi della meccanica hanno la stessa forma in tutti i sistemi inerziali: il moto rettilineo uniforme non si rivela dall'interno (un'accelerazione sì).

Invarianti: intervalli di tempo, lunghezze, accelerazioni, masse, forze, leggi. Relative: posizioni, spostamenti, velocità, traiettorie, energia cinetica, lavoro.

Abbiamo sempre supposto che S′ si muovesse con velocità costante. Ma i veicoli frenano, curvano, ripartono; e la stessa Terra ruota. Che cosa accade alle leggi della dinamica quando le osserviamo da un sistema che accelera? È la domanda del prossimo capitolo.

SINTESI

- Un osservatore è un sistema di riferimento con i suoi strumenti di misura; un evento è un fatto che accade in un punto e in un istante, e ogni osservatore gli attribuisce tre coordinate e un tempo.
- La meccanica classica assume il tempo assoluto: $t = t'$, gli intervalli di tempo e la simultaneità sono gli stessi per tutti gli osservatori. È un'ipotesi, confermata a velocità ordinarie.
- Se S′ trasla rispetto a S con velocità costante $\boldsymbol{V}$ e le origini coincidono a $t = 0$, valgono le trasformazioni di Galileo: $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}' + \boldsymbol{V}t$, cioè $x = x' + Vt$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$.
- Le trasformazioni inverse hanno la stessa forma con $-V$ al posto di V: nessuno dei due sistemi è privilegiato.
- La traiettoria dipende dal sistema: una pallina lasciata cadere su un treno in moto uniforme scende in verticale per il passeggero e descrive una parabola per chi è a terra.
- Dalle trasformazioni si dimostra la composizione delle velocità $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$, una somma vettoriale; $\boldsymbol{V}$ è la velocità di trascinamento.
- Se $\boldsymbol{V}$ è costante l'accelerazione è invariante, $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$; poiché masse e forze sono le stesse, il secondo principio vale in tutti i sistemi inerziali.
- Ogni sistema in moto rettilineo uniforme rispetto a un sistema inerziale è inerziale: i sistemi inerziali sono infiniti ed equivalenti.
- Principio di relatività galileiana: le leggi della meccanica hanno la stessa forma in tutti i sistemi inerziali; nessun esperimento di meccanica fatto all'interno di un sistema rivela se esso è fermo o in moto rettilineo uniforme.
- Galileo lo espresse nel *Dialogo* (1632) con la cabina chiusa di una nave; Newton lo riformulò come corollario delle sue leggi nei *Principia* (1687).
- Il principio non vale per i moti accelerati, che si rivelano dall'interno, e non rende relative tutte le grandezze: tempo, lunghezze, accelerazioni, masse e forze sono invarianti.
- Posizioni, velocità, traiettorie, energia cinetica e lavoro sono relativi, ma il teorema dell'energia cinetica vale in ogni sistema inerziale.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Le trasformazioni di Galileo si basano sull'ipotesi che:

   A. le lunghezze dipendano dal sistema di riferimento

   B. il tempo scorra allo stesso modo per tutti gli osservatori

   C. le velocità siano le stesse in tutti i sistemi inerziali

   D. il sistema S′ possa accelerare rispetto a S

2. ● Il sistema S′ si muove lungo l'asse x di S a 3,0 m/s, e all'istante zero le origini coincidono. Un punto fermo in S′ in $x' = 5{,}0$ m, all'istante $t = 2{,}0$ s, ha in S la coordinata:

   A. 5,0 m
   B. 6,0 m
   C. 11 m
   D. −1,0 m

3. ● Quale di queste grandezze ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali?

   A. la velocità di un corpo
   B. l'energia cinetica di un corpo
   C. la posizione di un corpo
   D. l'accelerazione di un corpo

4. ●● Un passeggero cammina verso la coda di un treno a 1,2 m/s rispetto al treno, che viaggia a 30 m/s. Rispetto ai binari il passeggero si muove a:

   A. 28,8 m/s, nel verso del moto del treno
   B. 31,2 m/s, nel verso del moto del treno
   C. 1,2 m/s, verso la coda del treno
   D. 30 m/s, nel verso del moto del treno

5. ●● Il principio di relatività galileiana afferma che:

   A. nessun esperimento di meccanica rivela se un sistema sta accelerando
   B. le leggi della meccanica hanno la stessa forma in tutti i sistemi inerziali
   C. tutte le grandezze fisiche dipendono dal sistema di riferimento
   D. il suolo è l'unico sistema di riferimento inerziale

6. ●● Una pallina viene lasciata cadere da ferma (rispetto al vagone) in un treno che viaggia a velocità costante. Trascurando l'aria, per un osservatore a terra la pallina descrive:

   A. un segmento verticale
   B. un segmento obliquo
   C. un arco di parabola
   D. un arco di circonferenza

7. ●● Il sistema S è inerziale e il sistema S′ si muove rispetto a S di moto rettilineo uniforme. Allora S′:

   A. è anch'esso inerziale
   B. è inerziale solo se è fermo rispetto a S
   C. non è inerziale, perché si muove rispetto a S
   D. è inerziale solo se la sua velocità è piccola

8. ●●● Un corpo di 2,0 kg si muove a 3,0 m/s rispetto al suolo. In un sistema di riferimento che si muove rispetto al suolo a 3,0 m/s nella stessa direzione, ma in verso opposto, l'energia cinetica del corpo vale:

   A. 0 J
   B. 9,0 J
   C. 18 J
   D. 36 J

Vero o falso

9. ● Nella meccanica di Galileo e di Newton l'intervallo di tempo fra due eventi è lo stesso per tutti gli osservatori. V / F

10. ● La traiettoria di un corpo è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali. V / F

11. ●● Se il sistema S′ accelera rispetto al sistema S, l'accelerazione di un corpo misurata in S′ è uguale a quella misurata in S. V / F

12. ●● Con un esperimento di meccanica eseguito in una cabina chiusa si può capire se la cabina sta frenando. V / F

13. ●●● Il lavoro compiuto da una forza costante su un corpo, in un dato intervallo di tempo, ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali. V / F

Applicare

14. ● Il sistema S′ si muove rispetto a S lungo l'asse x a 12 m/s; all'istante zero le origini coincidono. Un evento ha in S′ le coordinate $x' = 40$ m, $y' = 3{,}0$ m, $t' = 5{,}0$ s. Quali sono le sue coordinate in S?

15. ● Un treno viaggia a 20 m/s e il sistema S′ è solidale con esso; le origini di S (il binario) e di S′ coincidono a $t = 0$. Un lampo si accende in $x = 250$ m all'istante $t = 10$ s. In quale punto di S′ avviene il lampo?

16. ● Un tapis roulant dell'aeroporto scorre a 0,80 m/s. Calcola la velocità rispetto al pavimento di una persona che cammina sul tapis a 1,3 m/s rispetto a esso: a) nello stesso verso del tapis; b) in verso opposto.

17. ●● In una giornata senza vento le gocce di pioggia cadono in verticale a 7,0 m/s. Un'auto viaggia in orizzontale a 14 m/s. Con le trasformazioni inverse delle velocità, $\boldsymbol{v}' = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{V}$, calcola il modulo della velocità delle gocce rispetto all'auto e l'angolo che essa forma con la verticale.

18. ●● Completa. Nelle trasformazioni di Galileo $x =$ _____ e $t =$ _____ ; le velocità si compongono come _____ , mentre l'accelerazione è _____ purché la velocità di trascinamento sia _____ .

19. ●● Nel grafico della Figura 2.4 leggi le posizioni x e x' del ciclista all'istante $t = 3$ s e verifica che la loro differenza è uguale a Vt. Quale proprietà del grafico mostra che l'accelerazione del ciclista è la stessa per i due osservatori?

20. ●● Su un treno che viaggia a 20 m/s un bambino fa rotolare sul pavimento una palla di 0,50 kg a 4,0 m/s rispetto al treno. Calcola l'energia cinetica della palla nel sistema del treno e nel sistema del binario, se la palla rotola: a) verso la testa del treno; b) verso la coda.

21. ●● Sull'autostrada un'auto a 120 km/h sorpassa un camion che viaggia a 90 km/h nella stessa direzione. Qual è la velocità dell'auto rispetto al camion, in m/s? Quanto dura il sorpasso, se l'auto deve guadagnare 40 m rispetto al camion?

Problemi

22. ●● Un vagone lungo 24 m viaggia a 20 m/s. Un ragazzo, dalla porta posteriore, fa rotolare una pallina verso la porta anteriore a 3,0 m/s rispetto al vagone. a) Quanto tempo impiega la pallina a raggiungere la porta anteriore? b) Di quanto si è spostata rispetto ai binari? c) Rispondi alle stesse domande se la pallina viene lanciata a 3,0 m/s dalla porta anteriore verso quella posteriore.

23. ●● Un fiume largo 60 m ha una corrente di 1,5 m/s. Una barca a motore ha, rispetto all'acqua, una velocità di 2,5 m/s. a) In quale direzione deve puntare la prua per arrivare esattamente di fronte al punto di partenza? b) Quanto dura la traversata? (Ripassa *Fisica 2*, capitolo 1, e descrivi il problema con i due sistemi di riferimento S, la riva, e S′, l'acqua.)

24. ●●● Un carrello si muove su una rotaia orizzontale a 2,0 m/s costanti. Un lanciatore montato sul carrello spara una pallina verso l'alto a 6,0 m/s rispetto al carrello. Trascura l'aria. a) Quale altezza massima raggiunge la pallina? b) Dopo quanto tempo ricade, e in quale punto del carrello? c) Per un osservatore a terra, con quale velocità (modulo e angolo con l'orizzontale) parte la pallina, e di quanto si sposta in orizzontale durante il volo? d) Se, durante il volo, il carrello rallentasse con decelerazione costante di 1,0 m/s^2, dove ricadrebbe la pallina rispetto al lanciatore? (Collega con il moto del proiettile, *Fisica 2*, capitolo 2.)

25. ●●● In un treno che viaggia a 15 m/s un passeggero lascia cadere una pallina di 0,20 kg da 1,25 m di altezza sul pavimento. Trascura l'aria. a) Con la conservazione dell'energia meccanica (*Fisica 2*, capitolo 10) calcola, nel sistema del treno, la velocità con cui la pallina tocca il pavimento e la variazione della sua energia cinetica. b) Calcola l'energia cinetica iniziale e finale e la sua variazione nel sistema del binario. c) Spiega perché il lavoro del peso è lo stesso nei due sistemi, mentre in generale il lavoro di una forza è una grandezza relativa.

26. ●● Un aereo vola da A a B, 480 km verso est, e poi torna in A. La sua velocità rispetto all'aria è 240 km/h e per tutto il viaggio soffia un vento da ovest di 60 km/h. a) Calcola la velocità rispetto al suolo all'andata e al ritorno. b) Quanto dura l'intero viaggio? c) Il vento fa risparmiare tempo, o ne fa perdere, rispetto a una giornata senza vento? Quanto?

27. ●●● Su una nave che procede a 5,0 m/s due marinai giocano a palla. Ogni lancio parte con una velocità, rispetto alla nave, di 6,0 m/s in orizzontale e 4,9 m/s in verticale, e la palla viene presa alla stessa altezza da cui è partita. Trascura l'aria. a) Quanto dura il volo e quale distanza percorre la palla nel sistema della nave, se è lanciata verso prua? E se è lanciata verso poppa? b) Calcola, per i due lanci, lo spostamento orizzontale della palla rispetto al mare. c) Calcola il modulo della velocità di lancio rispetto al mare nei due casi. d) Collega il risultato di a) con il passo di Galileo sul lancio «all'amico».

28. ●●● Una barca a motore risale un fiume a velocità costante rispetto all'acqua e percorre 1,2 km, rispetto alla riva, in 10 min; poi torna indietro, con lo stesso regime di motore, e ripercorre gli stessi 1,2 km in 6,0 min. a) Calcola la velocità della barca rispetto all'acqua e la velocità della corrente. b) Alla partenza la barca perde una bottiglia, che galleggia trascinata dalla corrente. Dopo 10 min di risalita il pilota se ne accorge, inverte immediatamente la rotta e torna indietro alla stessa velocità rispetto all'acqua. Usando il sistema di riferimento solidale con l'acqua, trova quanto tempo impiega a raggiungere la bottiglia e a quale distanza dal punto di partenza la ritrova.

29. ●●● Due auto si avvicinano a un incrocio lungo strade perpendicolari. L'auto A va verso nord a 15 m/s e all'istante zero si trova 150 m a sud dell'incrocio; l'auto B va verso est a 20 m/s e si trova 200 m a ovest dell'incrocio. a) Calcola la velocità di B nel sistema di riferimento solidale con A (modulo e direzione). b) Mostra che in quel sistema B si muove in linea retta verso A: che cosa succede, se nessuno frena? c) Se B viaggiasse invece a 18 m/s, dopo quanto tempo la distanza fra le due auto sarebbe minima, e quanto varrebbe?

Ragionare e argomentare

30. ●● Trova l'errore nel ragionamento: «Su un treno che viaggia a 100 km/h, se salto verso l'alto e resto in aria mezzo secondo, ricado circa 14 m più indietro, perché nel frattempo il treno avanza sotto di me».

31. ●●● Sei chiuso nella cabina di una nave, senza finestre, e hai a disposizione un pendolo, un bicchiere d'acqua e una pallina. Progetta un esperimento per stabilire se la nave sta accelerando. Spiega poi perché nessun esperimento con gli stessi strumenti ti permetterebbe di stabilire se la nave è ferma o si muove di moto rettilineo uniforme.

32. ●● Esponi l'argomento della torre contro il moto della Terra e la risposta di Galileo. Spiega in che senso l'analogia fra la Terra e la nave è soltanto approssimata.

PER APPROFONDIRE

- [DIA] Galileo Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*: nella Giornata seconda la discussione sulla pietra lasciata cadere dalla torre e dall'albero della nave, e il passo sulla cabina «sotto coverta».
- [NEW] Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: i corollari alle leggi del moto, in particolare il quinto, e lo scolio sul tempo e sullo spazio assoluti.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: il capitolo sulla meccanica classica racconta, quasi senza formule, i sistemi inerziali e il principio di relatività di Galileo, prima di mostrare perché fu necessario superarlo.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: il capitolo sulla relatività ristretta parte proprio dalle trasformazioni di Galileo e dal loro limite.
- [HEW] P. G. Hewitt, *Conceptual Physics*: esempi quotidiani di moto relativo e di composizione delle velocità.

Glossario del capitolo

Argomento della torre
Argomento contro il moto della Terra: se la Terra ruotasse, una pietra lasciata cadere da una torre dovrebbe toccare terra lontano dal suo piede. Galileo mostrò che non prova nulla.

Equivalenza dei sistemi inerziali
Per le leggi della meccanica nessun sistema inerziale si distingue dagli altri: ciascuno può essere considerato fermo.

Evento
Un fatto che accade in un punto e in un istante; ogni osservatore gli attribuisce tre coordinate spaziali e un tempo.

Grandezza invariante
Grandezza che ha lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento inerziali (intervalli di tempo, lunghezze, accelerazioni, masse, forze).

Grandezza relativa
Grandezza il cui valore dipende dal sistema di riferimento (posizione, velocità, traiettoria, energia cinetica, lavoro).

Invarianza dell'accelerazione
Proprietà per cui l'accelerazione di un corpo è la stessa in due sistemi che si muovono l'uno rispetto all'altro con velocità costante: $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$.

Legge di composizione galileiana delle velocità
La relazione $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$, ricavata dalle trasformazioni di Galileo: la velocità in S è la somma vettoriale della velocità in S′ e della velocità di trascinamento.

Osservatore
Un sistema di riferimento insieme ai regoli e agli orologi fermi rispetto a esso, con cui si misurano posizioni e istanti.

Principio di relatività galileiana
Le leggi della meccanica hanno la stessa forma in tutti i sistemi inerziali; nessun esperimento di meccanica interno a un sistema ne rivela il moto rettilineo uniforme.

Simultaneità assoluta
Conseguenza del tempo assoluto: due eventi contemporanei per un osservatore lo sono per tutti.

Sistema di riferimento privilegiato
Un ipotetico sistema «veramente fermo», rispetto al quale misurare velocità assolute; il principio di relatività esclude che la meccanica possa individuarlo.

Solidale
Detto di un sistema di riferimento fermo rispetto a un corpo e che si muove con esso (per esempio, gli assi disegnati sul pavimento di un treno).

Spazio assoluto
Per Newton, uno spazio immobile e indipendente dai corpi; il moto uniforme rispetto a esso non si può rivelare con esperimenti di meccanica.

Tempo assoluto
Ipotesi della meccanica classica secondo cui il tempo scorre allo stesso modo per tutti gli osservatori: $t = t'$.

Trasformazioni di Galileo
Le relazioni $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}' + \boldsymbol{V}t$, $t = t'$ (per componenti $x = x' + Vt$, $y = y'$, $z = z'$) fra le coordinate di un evento in due sistemi in moto relativo uniforme.

Trasformazioni inverse
Le relazioni che danno le coordinate in S′ a partire da quelle in S: $x' = x - Vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$.

Velocità di trascinamento
La velocità $\boldsymbol{V}$ con cui il sistema S′ si muove rispetto al sistema S; è la velocità, rispetto a S, di un oggetto fermo in S′.

Soluzioni

1. B. Il tempo è assoluto: $t = t'$; le lunghezze sono anch'esse le stesse per tutti, e S′ deve avere velocità costante.

2. C. $x = x' + Vt = 5{,}0\text{ m} + 3{,}0\text{ m/s} \times 2{,}0\text{ s} = 11\text{ m}$.

3. D. Se la velocità di trascinamento è costante, $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$; velocità, posizione ed energia cinetica sono relative.

4. A. $v = v' + V = -1{,}2\text{ m/s} + 30\text{ m/s} = 28{,}8\text{ m/s}$, nel verso del moto del treno.

5. B. È l'enunciato del principio. Un'accelerazione si rivela (A è falsa); molte grandezze sono invarianti (C è falsa); i sistemi inerziali sono infiniti (D è falsa).

6. C. Per chi è a terra la pallina parte con la velocità orizzontale del treno: è un lancio orizzontale, e la traiettoria è un arco di parabola.

7. A. Se S′ trasla con velocità costante, $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$ e le forze sono le stesse: il primo e il secondo principio valgono anche in S′.

8. D. Nel nuovo sistema $\boldsymbol{V}$ ha componente −3,0 m/s, quindi $v' = v - V = 3{,}0\text{ m/s} - (-3{,}0\text{ m/s}) = 6{,}0\text{ m/s}$; $K' = \tfrac{1}{2} \times 2{,}0\text{ kg} \times (6{,}0\text{ m/s})^2 = 36\text{ J}$.

9. V. È l'ipotesi del tempo assoluto, $t = t'$, da cui $\Delta t = \Delta t'$.

10. F. La traiettoria è relativa: la pallina lasciata cadere su un treno scende in verticale per il passeggero e descrive una parabola per chi è a terra.

11. F. Se S′ accelera con accelerazione $\boldsymbol{A}$, si ha $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{A}$: l'accelerazione è invariante solo fra sistemi in moto relativo uniforme.

12. V. Il principio di relatività riguarda solo il moto rettilineo uniforme: in una cabina che frena una pallina comincia a rotolare in avanti e un pendolo si inclina.

13. F. La forza è invariante, ma lo spostamento del corpo nello stesso intervallo di tempo cambia di $V\Delta t$: anche il lavoro cambia. Cambia allo stesso modo ΔK, così che $W = \Delta K$ vale in ogni sistema.

14. $x = x' + Vt = 40\text{ m} + 12\text{ m/s} \times 5{,}0\text{ s} = 100\text{ m}$; $y = y' = 3{,}0\text{ m}$; $t = t' = 5{,}0\text{ s}$ (e $z = z'$).

15. $x' = x - Vt = 250\text{ m} - 20\text{ m/s} \times 10\text{ s} = 50\text{ m}$, all'istante $t' = 10\text{ s}$.

16. a) $v = 1{,}3\text{ m/s} + 0{,}80\text{ m/s} = 2{,}1\text{ m/s}$, nel verso del tapis. b) $v = -1{,}3\text{ m/s} + 0{,}80\text{ m/s} = -0{,}50\text{ m/s}$: la persona si muove rispetto al pavimento a 0,50 m/s nel verso in cui cammina, opposto a quello del tapis.

17. Asse x nel verso del moto dell'auto, asse y verso l'alto: $\boldsymbol{v} = (0; -7{,}0\text{ m/s})$, $\boldsymbol{V} = (14\text{ m/s}; 0)$, quindi $\boldsymbol{v}' = (-14\text{ m/s}; -7{,}0\text{ m/s})$. Modulo $\sqrt{(14^2 + 7{,}0^2)}\text{ m/s} \approx 16\text{ m/s}$; angolo con la verticale: $\tan\alpha = 14/7{,}0 = 2{,}0$, $\alpha \approx 63°$, inclinato all'indietro.

18. $x' + Vt$; t'; vettori ($\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{V}$); invariante (la stessa nei due sistemi); costante.

19. Dal grafico (o dalla Tabella 2.1): $x = 14{,}4\text{ m}$, $x' = -9{,}6\text{ m}$; $x - x' = 24{,}0\text{ m} = 8{,}0\text{ m/s} \times 3\text{ s}$. Le due curve si incurvano allo stesso modo: differiscono per la retta Vt, che ha curvatura nulla, quindi le velocità aumentano allo stesso ritmo.

20. Nel sistema del treno, in entrambi i casi, $K' = \tfrac{1}{2} \times 0{,}50\text{ kg} \times (4{,}0\text{ m/s})^2 = 4{,}0\text{ J}$. Nel sistema del binario: a) $v = 24\text{ m/s}$, $K = \tfrac{1}{2} \times 0{,}50\text{ kg} \times (24\text{ m/s})^2 = 144\text{ J} \approx 1{,}4 \times 10^2\text{ J}$; b) $v = 16\text{ m/s}$, $K = 64\text{ J}$.

21. Velocità relativa: 120 km/h − 90 km/h = 30 km/h = 8,3 m/s. Durata: $t = 40\text{ m} / 8{,}33\text{ m/s} \approx 4{,}8\text{ s}$.

22. S = binari, S′ = vagone. a) $t = 24\text{ m} / 3{,}0\text{ m/s} = 8{,}0\text{ s}$ (lo stesso in entrambi i sistemi). b) $v = 23\text{ m/s}$, $\Delta x = 23\text{ m/s} \times 8{,}0\text{ s} \approx 1{,}8 \times 10^2\text{ m}$ (184 m, cioè 24 m + 160 m). c) Stesso tempo, 8,0 s; ora $v = 20\text{ m/s} - 3{,}0\text{ m/s} = 17\text{ m/s}$ e $\Delta x = 17\text{ m/s} \times 8{,}0\text{ s} = 136\text{ m} \approx 1{,}4 \times 10^2\text{ m}$, sempre in avanti: rispetto ai binari la pallina avanza anche se rotola verso la coda.

23. S = riva, S′ = acqua, $\boldsymbol{V}$ = corrente (1,5 m/s lungo il fiume). a) La velocità rispetto alla riva deve essere

perpendicolare alla corrente, quindi la componente di $\vec{v}'$ lungo il fiume deve valere −1,5 m/s: sen θ = 1,5/2,5 = 0,60, θ ≈ 37° verso monte rispetto alla perpendicolare alla riva. b) Velocità di attraversamento $v = \sqrt{(2{,}5^2 - 1{,}5^2)}$ m/s = 2,0 m/s; t = 60 m / 2,0 m/s = 30 s.

24. Sulla pallina, in volo, agisce solo il peso. a) Nel sistema del carrello, che è inerziale perché ha velocità costante, è un lancio verticale: $h = v'_0{}^2/(2g) = (6{,}0\ \text{m/s})^2/(2 \times 9{,}8\ \text{m/s}^2) \approx 1{,}8$ m; l'altezza è la stessa in S, perché $y = y'$. b) $t = 2v'_0/g = 2 \times 6{,}0 / 9{,}8$ s ≈ 1,2 s; la pallina ricade nel lanciatore ($x' = 0$). c) In S: v_x = 2,0 m/s, v_y = 6,0 m/s (composizione delle velocità); $v = \sqrt{(2{,}0^2 + 6{,}0^2)}$ m/s ≈ 6,3 m/s, inclinata di $\tan^{-1}(6{,}0/2{,}0) \approx 72°$ sull'orizzontale; spostamento orizzontale 2,0 m/s × 1,22 s ≈ 2,4 m, uguale a quello del carrello. d) Ragioniamo da terra (S, inerziale): la pallina percorre ancora 2,45 m in orizzontale, mentre il carrello percorre 2,0 m/s × 1,22 s − ½ × 1,0 m/s² × (1,22 s)² ≈ 1,70 m (si ferma solo dopo 2,0 s, quindi la formula vale). La pallina ricade circa 0,75 m davanti al lanciatore: il carrello che frena non è più un sistema inerziale.

25. a) Sistema del treno, inerziale: sulla pallina agisce solo il peso, forza conservativa, quindi si conserva l'energia meccanica. $v' = \sqrt{(2gh)} = \sqrt{(2 \times 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times 1{,}25\ \text{m})} \approx 4{,}9$ m/s (4,95 m/s); $\Delta K' = mgh$ = 0,20 kg × 9,8 m/s² × 1,25 m = 2,45 J ≈ 2,5 J. b) Sistema del binario: all'inizio la pallina ha la velocità del treno, K_i = ½ × 0,20 kg × (15 m/s)² = 22,5 J; alla fine ha componenti 15 m/s e 4,95 m/s, quindi K_f = ½ × 0,20 kg × $(15^2 + 4{,}95^2)$ m²/s² ≈ 24,95 J; $\Delta K \approx 2{,}45$ J. Le energie cinetiche sono diverse, la variazione è la stessa. c) Il peso è verticale, e lo spostamento verticale (1,25 m verso il basso) è lo stesso nei due sistemi; la parte di spostamento in più che si misura da terra, $\vec{V}\Delta t$, è orizzontale, perpendicolare al peso, e non contribuisce al lavoro. Per una forza con una componente parallela a $\vec{V}$ il lavoro sarebbe invece diverso nei due sistemi.

26. a) Andata (vento a favore): 240 km/h + 60 km/h = 300 km/h; ritorno (vento contrario): 240 km/h − 60 km/h = 180 km/h. b) 480 km / 300 km/h + 480 km / 180 km/h = 1,60 h + 2,67 h ≈ 4,27 h, circa 4 h 16 min. c) Senza vento: 2 × 480 km / 240 km/h = 4,00 h. Il vento fa perdere circa 0,27 h ≈ 16 min: il tempo guadagnato all'andata è minore di quello perso al ritorno, perché con il vento contrario l'aereo resta in volo più a lungo.

27. Il sistema della nave è inerziale: vale il principio di relatività. a) Lancio a pari quota: $t = 2v'_y/g = 2 \times 4{,}9 / 9{,}8$ s = 1,0 s. Nel sistema della nave la gittata è 6,0 m/s × 1,0 s = 6,0 m, sia verso prua sia verso poppa. b) Verso prua v_x = 6,0 m/s + 5,0 m/s = 11 m/s: 11 m in avanti rispetto al mare. Verso poppa v_x = −6,0 m/s + 5,0 m/s = −1,0 m/s: 1,0 m verso poppa rispetto al mare. c) Verso prua $\sqrt{(11^2 + 4{,}9^2)}$ m/s ≈ 12 m/s; verso poppa $\sqrt{(1{,}0^2 + 4{,}9^2)}$ m/s ≈ 5,0 m/s. d) Rispetto al mare le due palle partono con velocità molto diverse, ma il marinaio, che lancia nel sistema della nave, imprime lo stesso lancio nei due versi e la palla percorre la stessa distanza: è ciò che dice Galileo, «non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa».

28. a) Rispetto alla riva: risalita 1200 m / 600 s = 2,0 m/s; discesa 1200 m / 360 s ≈ 3,33 m/s. Se w è la velocità rispetto all'acqua e u quella della corrente: $w - u$ = 2,0 m/s e $w + u$ = 3,33 m/s, da cui $w \approx 2{,}7$ m/s e $u \approx 0{,}67$ m/s. b) Nel sistema dell'acqua, inerziale, la bottiglia è ferma e la barca si allontana e ritorna con la stessa velocità w: se si è allontanata per 10 min, impiega altri 10 min a tornare. In tutto passano 20 min = 1200 s, durante i quali la bottiglia, rispetto alla riva, è stata trascinata di $u \times 1200$ s ≈ 0,667 m/s × 1200 s ≈ $8{,}0 \times 10^2$ m a valle del punto di partenza. Nel sistema della riva il calcolo sarebbe molto più lungo.

29. Asse x verso est, asse y verso nord, origine nell'incrocio. a) Nel sistema solidale con A, che è inerziale perché A ha velocità costante: $\vec{v}_B{}' = \vec{v}_B - \vec{v}_A$ = (20 m/s; −15 m/s), modulo $\sqrt{(20^2 + 15^2)}$ m/s = 25 m/s, diretta a 37° a sud della direzione est. b) La posizione di B rispetto ad A all'istante zero è (−200 m; 150 m), cioè 250 m in direzione esattamente opposta a $\vec{v}_B{}'$: B si muove in linea retta verso A e lo raggiunge dopo 250 m / 25 m/s = 10 s. Senza frenate le auto si scontrano nell'incrocio (A ci arriva in 150/15 = 10 s, B in 200/20 = 10 s). c) Ora $\vec{v}_B{}'$ = (18 m/s; −15 m/s). La

posizione relativa è $(-200\ \text{m} + 18\ \text{m/s} \cdot t;\ 150\ \text{m} - 15\ \text{m/s} \cdot t)$; il quadrato della distanza, $d^2 = (18t - 200)^2 + (150 - 15t)^2$, è una funzione di secondo grado di t con il minimo nel vertice: $t = (18 \times 200 + 15 \times 150)/(18^2 + 15^2)\ \text{s} = 5850/549\ \text{s} \approx 10{,}7\ \text{s}$. In quell'istante la distanza vale circa 13 m.

30. Traccia di risposta. L'errore è dimenticare che, al momento del salto, si possiede già la velocità orizzontale del treno, 100 km/h ≈ 28 m/s, e la si conserva in aria, perché nessuna forza orizzontale agisce (trascurando l'aria, che nel vagone è trascinata dal treno). In mezzo secondo il passeggero e il pavimento avanzano entrambi di circa 14 m rispetto ai binari: si ricade nel punto di partenza. Nel sistema del treno, inerziale, il salto è identico a uno fatto a terra; si ricadrebbe spostati solo se il treno accelerasse o frenasse durante il salto.

31. Traccia di risposta. Un pendolo fermo resta verticale se la nave è inerziale; se la nave accelera si inclina all'indietro rispetto all'accelerazione (in avanti se la nave frena). Analogamente la superficie dell'acqua nel bicchiere si inclina e una pallina ferma su un tavolo liscio comincia a rotolare. Basta osservare se questi oggetti, lasciati in quiete, restano in quiete. Se invece la nave si muove di moto rettilineo uniforme, la cabina è un sistema inerziale, in cui valgono le stesse leggi della dinamica che valgono a nave ferma: ogni esperimento dà lo stesso risultato nei due casi (principio di relatività), quindi non contiene alcuna informazione sulla velocità della nave.

32. Traccia di risposta. Argomento: se la Terra ruotasse, durante la caduta la torre si sposterebbe verso oriente e la pietra dovrebbe toccare terra a occidente del piede della torre; poiché cade al piede, la Terra sarebbe ferma. Risposta di Galileo (*Dialogo*, Giornata seconda): la pietra possiede già il moto della torre e lo conserva, come la pietra lasciata dall'albero di una nave in moto, che cade al piede dell'albero; dunque la caduta al piede della torre non dice nulla sul moto della Terra. Limite: la nave trasla in linea retta, la Terra ruota; un sistema in rotazione non è inerziale, e infatti la pietra cade leggermente spostata, di pochi centimetri per torri molto alte e verso oriente (non verso occidente). L'effetto è così piccolo che con gli strumenti dell'epoca di Galileo non si poteva rivelare: fu misurato soltanto molto più tardi, fra la fine del Settecento e l'Ottocento.