

18. SISTEMI DI RIFERIMENTO INERZIALI

18.1. Trasformazioni galileiane

Abbiamo già osservato che il moto è relativo all'osservatore; di conseguenza il movimento di un punto materiale si svolge con proprietà diverse rispetto a due osservatori solidali a due sistemi di riferimento inerziali in moto l'uno rispetto all'altro. Vogliamo ora affrontare il problema più da vicino, limitando la trattazione, per ovvi motivi di semplicità, a casi particolari senza alcuna pretesa di completezza.

In generale, due osservatori che si trovino in due distinti sistemi di riferimento attribuiscono al punto in cui si realizza uno stesso evento coordinate diverse (l'evento può essere l'arrivo di un ciclista, la partenza di un'automobile, ecc. e avviene indipendentemente dal sistema di riferimento).

Un osservatore in un sistema di riferimento S assegna al punto, dopo accurate misure, tre coordinate x, y, z . Egli pertanto individua l'evento con quattro numeri x, y, z, t , che chiamiamo *coordinate spaziotemporali*. Un secondo osservatore, solidale col sistema S' in moto rettilineo uniforme rispetto a S , caratterizza lo stesso evento con quattro coordinate x', y', z', t' in generale diverse dalle precedenti.

Le relazioni tra le coordinate spaziotemporali di uno stesso evento nei due distinti sistemi di riferimento inerziali sono note nella loro formulazione classica come **trasformazioni galileiane**. Osserviamo, facendo molta attenzione a questo fatto, che nella fisica classica si ammette di poter definire il tempo indipendentemente dal sistema di riferimento, cioè due orologi identici, sincronizzati in un sistema S , sono sempre sincronizzati anche quando uno di essi si muove di moto rettilineo uniforme rispetto all'altro. Perciò le misure del tempo effettuate con i due orologi danno sempre lo stesso valore, cioè $t' = t$.

Per trovare le relazioni tra le coordinate supponiamo che inizialmente per $t = 0$ i due sistemi di riferimento $S: Oxyz$ e $S': O'x'y'z'$ collegati con i due osservatori coincidano e che nello stesso istante il sistema S' inizi a muoversi con velocità costante w secondo la comune direzione degli assi x e x' .

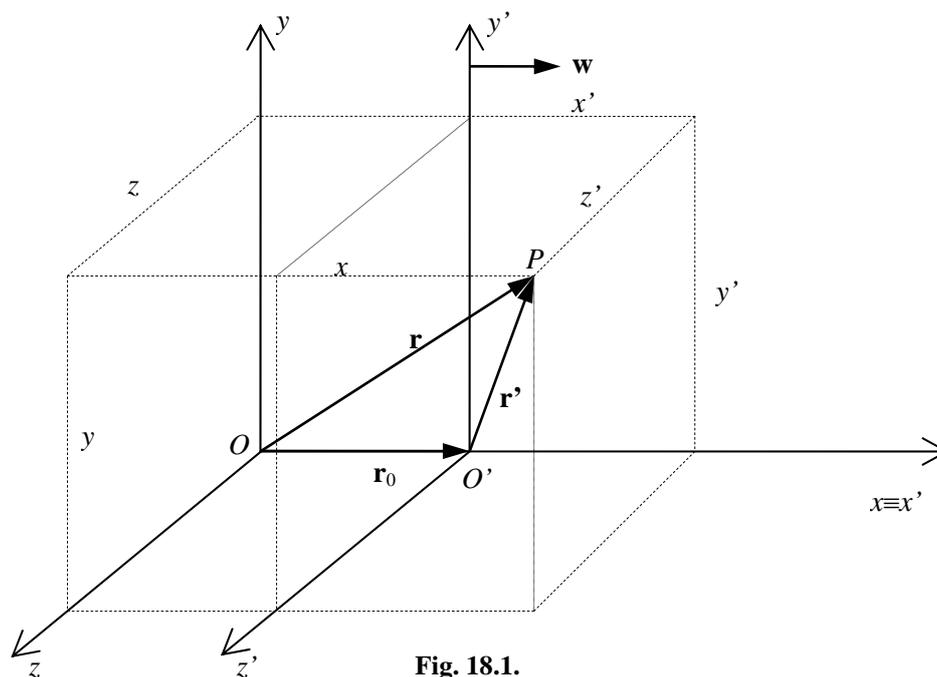


Fig. 18.1.

In Fig. 18.1 sono rappresentati i due sistemi dopo che è trascorso un tempo t ; lo spazio percorso dal sistema S' rispetto a S è wt , cioè la misura del segmento OO' .

Dalla figura, tenendo presente la definizione di coordinate cartesiane, si deducono facilmente le relazioni cercate:

$$x = x' + wt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \quad [18.1]$$

e le inverse

$$x' = x - wt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad [18.2]$$

Le quattro equazioni [18.1] e le inverse [18.2], note come **equazioni di una trasformazione galileiana**, o semplicemente **trasformazioni galileiane**, mettono in relazione le coordinate spaziotemporali di uno stesso evento in due distinti sistemi di riferimento S ed S' in moto rettilineo uniforme con velocità \mathbf{w} uno rispetto all'altro.

Le prime tre equazioni delle [18.1] e [18.2] sono suscettibili di una rappresentazione vettoriale, introducendo i **vettori posizione** $\mathbf{r} = \mathbf{OP}$, $\mathbf{r}' = \mathbf{O}'\mathbf{P}$ e $\mathbf{r}_0 = \mathbf{OO}'$, che individuano rispettivamente la posizione di P rispetto ai riferimenti S ed S' e la posizione di O' rispetto a S . Infatti, osservando la Fig. 18.1 si ricava

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{r}_0 = \mathbf{r}' + \mathbf{w}t \quad \text{e} \quad \mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 = \mathbf{r} - \mathbf{w}t \quad [18.3]$$

equazione equivalente alle prime tre equazioni delle [18.1] e [18.2] dato che le componenti cartesiane dei vettori posizione sono:

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= x \mathbf{i} + y \mathbf{j} + z \mathbf{k} \\ \mathbf{r}' &= x' \mathbf{i} + y' \mathbf{j} + z' \mathbf{k} \\ \mathbf{r}_0 &= wt \mathbf{i} \end{aligned} \quad [18.4]$$

Pertanto le [18.3] possono interpretarsi come la *forma vettoriale* delle trasformazioni di coordinate in due distinti sistemi inerziali S ed S' , cioè *delle trasformazioni galileiane*.

Se il sistema S' trasla rispetto ad S con velocità $\mathbf{w} = w_x \mathbf{i} + w_y \mathbf{j} + w_z \mathbf{k}$ in una direzione qualsiasi, le trasformazioni [18.1] e [18.3] diventano:

$$x = x' + w_x t, \quad y = y' + w_y t, \quad z = z' + w_z t, \quad t = t' \quad [18.5]$$

e

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{r}_0 = \mathbf{r}' + \mathbf{w}t \quad [18.6]$$

con le rispettive inverse.

18.2. Le trasformazioni galileiane applicate alle grandezze cinematiche del moto

Consideriamo due osservatori che in due distinti sistemi di riferimento inerziali S ed S' effettuano le misure delle grandezze cinematiche che caratterizzano il moto di un punto materiale P . Quali sono le relazioni tra le misure di una stessa grandezza nei due distinti sistemi inerziali? Risponderemo alla domanda considerando separatamente gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni.

18.2.1. Composizione degli spostamenti

Con riferimento alla Fig. 18.1, considerando lo spostamento $\Delta \mathbf{r}$ di un punto materiale che nell'istante t_1 si trova nella posizione individuata da $\mathbf{r}(t_1)$ e nell'istante t_2 si trova nella posizione individuata da $\mathbf{r}(t_2)$, essendo

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t_2) - \mathbf{r}(t_1) \quad \Rightarrow \quad \Delta \mathbf{r}' = \mathbf{r}'(t_2) - \mathbf{r}'(t_1) = \mathbf{r}(t_2) - \mathbf{w} t_2 - (\mathbf{r}(t_1) - \mathbf{w} t_1) = \Delta \mathbf{r} - \mathbf{w} (t_2 - t_1) \quad [18.7]$$

cioè

$$\Delta \mathbf{r}' = \Delta \mathbf{r} - \mathbf{w} (t_2 - t_1) = \Delta \mathbf{r} - \mathbf{w} \Delta t \quad \text{e} \quad \Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}' + \mathbf{w} \Delta t \quad [18.8]$$

(analoghe alla relazione [18.3] per le posizioni).

Pertanto possiamo concludere in base alle [18.8] affermando che lo *spostamento* $\Delta \mathbf{r}$ di un punto materiale P rispetto a un sistema di riferimento $Oxyz$ è uguale alla somma vettoriale dello spostamento $\Delta \mathbf{r}'$ dello stesso punto materiale rispetto a un altro sistema di riferimento $O'x'y'z'$ e dello spostamento $\Delta \mathbf{r}_0 = \mathbf{w} (t_2 - t_1)$ rispetto a $Oxyz$ che esso subirebbe se fosse trascinato da $O'x'y'z'$.

Per dare maggiore concretezza al risultato ottenuto, consideriamo un caso particolare. Un osservatore A seduto in un vagone di un treno lancia una sferetta lungo il pavimento nella stessa direzione e verso del movimento del treno. Supponiamo che la sferetta subisca lo spostamento di 4 m rispetto all'osservatore A , cioè rispetto al sistema di riferimento $O'x'y'z'$ solidale con il vagone e quindi col treno, in un intervallo di tempo in cui il treno si è spostato di 20 m.

Lungo la strada ferrata c'è un casellante C che osserva il movimento del treno; possiamo immaginare che il casellante analizzi le cose rispetto al riferimento $Oxyz$ solidale con la Terra. Ci domandiamo qual è lo spostamento della sferetta rispetto a C nello stesso intervallo di tempo in cui essa si è spostata di 4 m rispetto ad A .

Dalle [18.8], osservando che i vettori $\Delta \mathbf{r}'$ ed $\Delta \mathbf{r}_0$ sono equiversi, segue che la sferetta si è spostata rispetto a C complessivamente di 24 m. Analogamente nell'altro caso particolare in cui A lancia una sferetta in verso opposto al moto del treno: lo spostamento rispetto al casellante C è 16 m.

Se infine l'osservatore A lancia la sferetta perpendicolarmente alla direzione del moto del treno, posto $\overline{AB} = \Delta r' = 4 \text{ m}$ e $\overline{BC} = \Delta r_0 = 20 \text{ m}$, dalle [18.8], applicando il teorema di Pitagora per comporre i due

vettori $\Delta r'$ e Δr_0 , si ottiene per lo spostamento rispetto al casellante: $\overline{AC} = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{BC}^2} = 20.39 \text{ m}$.

18.2.2. Composizione delle velocità

La relazione [18.3] permette di esprimere la posizione di un punto P all'istante t rispetto al sistema di riferimento S , nota la posizione dello stesso punto rispetto al sistema S' in moto rettilineo uniforme con velocità \mathbf{w} rispetto a S secondo la comune direzione degli assi x e x' .

$$\mathbf{v}_m = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}(t_2) - \mathbf{r}(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\mathbf{r}'(t_2) + \mathbf{w}t_2 - (\mathbf{r}'(t_1) + \mathbf{w}t_1)}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}'(t_2) - \mathbf{r}'(t_1)}{\Delta t} + \mathbf{w} = \frac{\Delta \mathbf{r}'}{\Delta t} + \mathbf{w} = \mathbf{v}'_m + \mathbf{w} \quad [18.9]$$

cioè $\mathbf{v}_m = \mathbf{v}'_m + \mathbf{w}$ che diventa, per $\Delta t \rightarrow 0$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{w} \quad [18.10]$$

e la sua inversa

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{w} \quad [18.11]$$

Si ha così la legge di composizione delle velocità: *la velocità \mathbf{v} , misurata rispetto ad un sistema S è uguale alla velocità \mathbf{v}' misurata rispetto ad un sistema S' sommata vettorialmente alla velocità \mathbf{w} con cui si muove il sistema S' rispetto a S .*

Esempi

(A) *Una barca si muove parallelamente alle sponde di un fiume con la velocità di 3 m/s rispetto all'acqua. Sapendo che la corrente fluisce alla velocità di 1 m/s rispetto alle sponde, calcolare la velocità della barca rispetto alle sponde, distinguendo i due casi della barca che si muove nello stesso verso della corrente e della barca che si muove contro corrente.*

1° caso: barca in moto nel verso della corrente

Se indichiamo con \mathbf{v}' la velocità della barca rispetto all'acqua e con \mathbf{w} quella della corrente, cioè la velocità della barca se fosse trascinata dalla corrente, per la legge di composizione delle velocità, detta \mathbf{v} la velocità della barca rispetto alle sponde, si ha che per la [18.10] deve essere $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{w}$, in cui \mathbf{v}' e \mathbf{w} sono dirette nel verso della corrente e valgono rispettivamente $(3 \text{ m/s})\mathbf{i}$ e $(1 \text{ m/s})\mathbf{i}$. Ne segue che la velocità richiesta è parallela ed equiversa con la corrente ed è uguale a $(4 \text{ m/s})\mathbf{i}$.

2° caso: barca in moto contro corrente

Vale ancora la [18.10], ma questa volta \mathbf{v}' e \mathbf{w} hanno versi opposti, per cui la barca rispetto alle sponde si muove in verso contrario alla corrente con velocità uguale a $-(2 \text{ m/s})\mathbf{i}$.

(B) Un uomo attraversa un fiume con una barca a remi che mantiene sempre perpendicolare alla corrente. La velocità della corrente è $w = 1 \text{ m/s}$ e inoltre la direzione del moto della barca rispetto alle sponde forma con queste un angolo di 60° (Fig. 18.2). Sapendo che raggiunge la sponda opposta del fiume in un punto spostato a valle di 300 m rispetto al punto di partenza, determinare la velocità della barca rispetto all'acqua ed alle sponde e la larghezza del fiume.

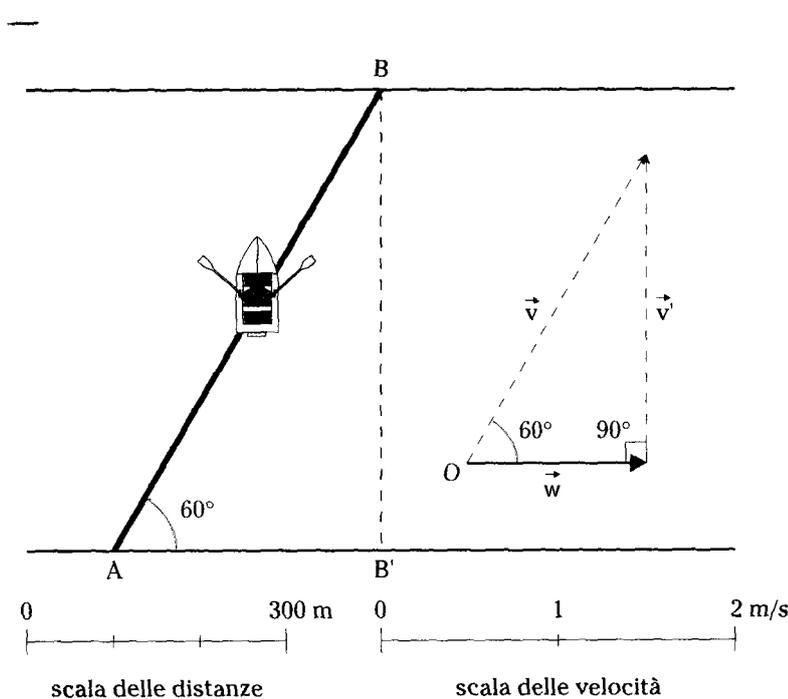


Fig. 18.2.

A causa della corrente, la barca, pur mantenendosi perpendicolare alla corrente, non segue un percorso trasversale rispetto alle sponde, ma quello obliquo AB indicato in figura. Indichiamo con \mathbf{v} e \mathbf{v}' rispettivamente la velocità della barca rispetto alle sponde e alla corrente; di queste conosciamo la direzione, in quanto \mathbf{v} è inclinata di 60° rispetto alle sponde, mentre \mathbf{v}' è perpendicolare alle sponde. Per la legge di composizione delle velocità è: $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{w}$ per cui con i dati del problema possiamo eseguire la rappresentazione grafica delle velocità indicata in Fig. 18.2 secondo la scala fissata.

Per tale costruzione basta disegnare il vettore \mathbf{w} e condurre dalla coda e dalla punta della freccia due direzioni, indicate in figura con una linea tratteggiata, rispettivamente a 60° e a 90° con \mathbf{w} .

La loro intersezione ci dà la punta della freccia sia di \mathbf{v} che di \mathbf{v}' , i cui valori possono essere determinati con il calcolo, oppure anche graficamente, essendosi fatta una rappresentazione in scala; infatti in figura si è formato un triangolo rettangolo con gli angoli acuti di 60° e di 30° , di cateti \mathbf{w} e \mathbf{v}' e di ipotenusa \mathbf{v} . Ricordando dalla geometria le ben note relazioni tra i lati di un siffatto triangolo rettangolo, si ha:

$$v = 2 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad v' = \sqrt{3} \text{ m/s} = 1.7 \text{ m/s}$$

Le due velocità \mathbf{v} e \mathbf{v}' sono così perfettamente individuate in modulo, direzione e verso.

Per determinare la larghezza del fiume osserviamo che il lasso di tempo Δt che la barca impiega per attraversarlo è quello stesso durante il quale si ha lo spostamento $AB' = \Delta x$ lungo le sponde.

Poiché Δx è originato unicamente dalla velocità della corrente w , si ha: $\Delta x = w \cdot \Delta t$ da cui:

$$\Delta t = \Delta x / w = (300 \text{ m}) / (1 \text{ m/s}) = 300 \text{ s}.$$

La barca si sposta trasversalmente al fiume unicamente per effetto della velocità rispetto all'acqua; indicando perciò con L la larghezza del fiume, si ha:

$$L = v' \cdot \Delta t = (\sqrt{3} \text{ m/s}) \times (300 \text{ s}) \cong 520 \text{ m}.$$

Quesiti

18.1. Due automobili si muovono a velocità in modulo uguali e costanti come è indicato nella Fig. A. Descrivi qualitativamente come appare al guidatore dell'automobile 1 il moto dell'automobile 2 e viceversa.

18.2. Un treno sta viaggiando verso nord alla velocità di 80 km/h . Un passeggero cammina lungo il treno alla velocità di 5 km/h ; qual è la sua velocità rispetto alla Terra se egli cammina:

- (a) verso la parte anteriore del treno?
- (b) verso la parte posteriore del treno?

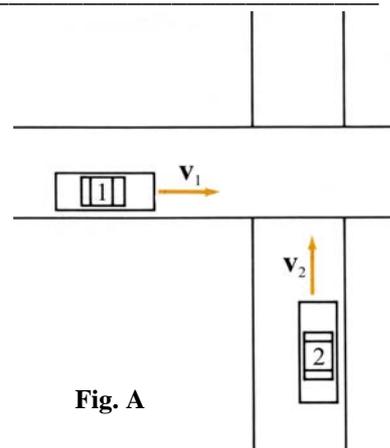


Fig. A

- 18.3.** In una delle sue opere Galileo disse che un corpo abbandonato a se stesso dalla sommità dell'albero di una nave in moto a velocità costante toccherebbe il ponte della nave in un punto direttamente al disotto del punto di partenza.
Rappresenta la traiettoria che il corpo percorrerebbe nel sistema di riferimento:
(a) della nave.
(b) di un osservatore situato su una boa mentre passa la nave.
- 18.4.** Una donna spinge a forza di remi una barca «attraverso» un fiume alla velocità di 6.0 km/h (la barca è mantenuta sempre in una direzione perpendicolare alla corrente). Il fiume fluisce alla velocità di 9.0 km/h ed è largo 0.30 km.
(a) In quale direzione procede realmente la barca della donna rispetto alla riva?
(b) Quanto tempo impiega la donna per attraversare il fiume?
(c) Quanto dista verso valle il suo punto di arrivo rispetto al punto di partenza?
(d) Quanto tempo impiegherebbe la donna per attraversare il fiume se non ci fosse la corrente?
(e) La donna può attraversare il fiume in modo tale da approdare in un punto opposto a quello di partenza senza spostarsi verso valle?

18.2.3. Composizione delle accelerazioni

In modo del tutto analogo a quanto abbiamo fatto per la legge di composizione delle velocità, indicando con \mathbf{a}_m e \mathbf{a}'_m i vettori che esprimono l'accelerazione media del punto materiale P rispetto a S e S' in un generico intervallo di tempo Δt :

$$\mathbf{a}_m = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}(t_2) - \mathbf{v}(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\mathbf{v}'(t_2) + \mathbf{w} - (\mathbf{v}'(t_1) + \mathbf{w})}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}'(t_2) - \mathbf{v}'(t_1)}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}'}{\Delta t} = \mathbf{a}'_m \quad [18.13]$$

cioè $\mathbf{a}_m = \mathbf{a}'_m$ che diventa, per $\Delta t \rightarrow 0$

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' \quad [18.14]$$

Quindi, come ci si aspettava in base al principio di relatività: **un punto materiale in moto ha uguale accelerazione rispetto a due sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.** Questo risultato ha un profondo significato fisico, in quanto, come vedremo successivamente, è uno dei punti di partenza per la costruzione della teoria della relatività.

Quesiti

- 18.5.** Un uomo abbandona a se stesso un pesante libro mentre cammina lungo il corridoio di un aeroplano che sta volando orizzontalmente verso ovest alla velocità di 800 km/h. Quale sarà l'accelerazione approssimata del libro?

18.3. Invarianza e covarianza per trasformazioni galileiane

In generale le grandezze meccaniche dipendono dalle coordinate spaziali e dal tempo, per cui c'è da attendersi che due osservatori inerziali O e O' in moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro troveranno attraverso le misure delle grandezze valori diversi. Quelle grandezze, invece, che assumono lo stesso valore per due osservatori inerziali si dice che sono **invarianti**. Più precisamente, poiché si passa dal sistema S collegato con O al sistema S' collegato con O' attraverso le trasformazioni di Galileo, le grandezze che nei due sistemi inerziali assumono lo stesso valore si dice che sono **invarianti per trasformazioni galileiane**. Esempi di grandezze invarianti nella fisica classica sono il *tempo*, in quanto si suppone che la sua misura sia indipendente dal sistema di riferimento, e la *massa* di un corpo, in quanto essa si suppone che esprima una proprietà del corpo che non varia con la velocità. Per quanto abbiamo osservato nella composizione delle grandezze cinematiche anche l'*accelerazione* di un punto mobile è invariante per trasformazioni galileiane, mentre non lo è la velocità. Anche la grandezza forza è un invariante in quanto $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

In modo analogo una legge fisica, cioè una relazione matematica tra alcune grandezze, si dice **covariante per trasformazioni galileiane** se assume la stessa forma in due sistemi S ed S' inerziali. Se, per esempio, una relazione tra due grandezze x e y del tipo $y = 5 \cdot x + 4$ nel sistema S , assume anche nel sistema S' la forma $y' = 5 \cdot x' + 4$ in cui x' e y' sono i corrispondenti valori nel sistema S' di x e y , si dice che la legge considerata che lega x e y è *covariante* per trasformazioni galileiane.

Se non solo la legge conserva la stessa forma, ma anche le grandezze x e x' , y e y' assumono lo stesso valore in S e S' , si dice che la legge considerata è invariante per trasformazioni galileiane.

In relazione all'esempio particolare considerato, se gli osservatori O e O' collegati con i due sistemi inerziali misurano per le grandezze x e y i valori 3 e 19 e per le grandezze x' e y' i valori 4 e 24, si ha:

$$\begin{array}{ll} \text{nel sistema } S: & y = 5 \cdot x + 4 \\ \text{nel sistema } S': & y' = 5 \cdot x' + 4 \end{array}$$

cioè le relazioni che intercedono tra x e y e tra x' e y' sono dello stesso tipo. Se ciò avviene per tutte le coppie di valori x e y , x' e y' la relazione $y = 5 \cdot x + 4$ è covariante. La stessa legge non è invariante in quanto x e x' , y e y' assumono valori diversi.

Problemi di fine capitolo

- 18.6.** Una barca si muove parallelamente alle sponde di un fiume con la velocità di 3 m/s rispetto all'acqua e nello stesso verso della corrente che a sua volta ha una velocità di 1m/s. Qual è la velocità della barca rispetto alle sponde? (Per rispondere individuare i sistemi di riferimento S e S' e fare uso della legge di composizione delle velocità). Qual è la velocità della barca rispetto alle sponde se essa si muove ora in verso opposto alla corrente?
- 18.7.** Due treni T_1 e T_2 si muovono su binari paralleli in versi opposti. Sapendo che T_1 viaggia alla velocità di 80 km/h e che T_2 rispetto a T_1 viaggia alla velocità di 150 km/h in verso opposto, determinare la velocità di T_2 rispetto al suolo. (Per rispondere individuare i sistemi di riferimento S e S' e fare uso della legge di composizione delle velocità).
- 18.8.** Un viaggiatore seduto in un vagone di un treno in movimento alla velocità di 90 km/h osserva, mentre piove, che le gocce dell'acqua cadono sui finestrini a 60° rispetto alla verticale. Se il treno è invece fermo la pioggia cade verticalmente. Determinare la velocità delle gocce d'acqua rispetto al treno e al suolo. (Per rispondere individuare i sistemi di riferimento S e S' e fare uso della legge di composizione delle velocità).
- 18.9.** Un uomo attraversa un fiume con una barca a remi che mantiene sempre perpendicolare alla corrente. La velocità della corrente è $w = 3$ m/s ed inoltre la direzione di moto della barca rispetto alle sponde forma con queste un angolo θ di 30° (Fig. B). Sapendo che raggiunge la sponda opposta del fiume in un punto spostato a valle di 300 m rispetto al punto di partenza, si chiede la velocità della barca rispetto all'acqua ed alle sponde e la larghezza del fiume (Per rispondere individuare i sistemi di riferimento S e S' e fare uso della legge di composizione delle velocità).

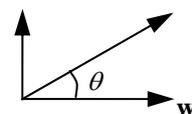


Fig. B

- 18.10.** Descrivere il moto di un'altalena visto da un'altra altalena esattamente uguale alla prima, nel caso in cui le altalene siano partite insieme e con la stessa spinta.
- 18.11.** Un insetto situato nel centro del piatto girevole di un fonografo striscia in linea retta con velocità costante verso un punto della periferia del piatto. Descrivere il moto dell'insetto visto dall'alto da un osservatore, sapendo che il piatto ha una velocità di 16 giri al minuto e che l'insetto impiega 15 secondi per andare dal centro alla periferia del piatto.
- 18.12.** Se ti trovassi a bordo di un pallone aerostatico libero, trasportato dal vento con velocità costante e tenessi in mano una bandierina di tessuto leggero, in quale direzione sventolerebbe la bandierina?
- 18.13.** Si supponga che nel quesito 18.4 del paragrafo 18.2.2 a pag. 214 la barca sia provvista di un motore e possa muoversi a una velocità costante di 18,0 km/h in acqua calma.

- (a) In quale direzione la donna dovrebbe dirigere la barca per attraversare il fiume in direzione perpendicolare alle rive?
- (b) Quale sarà la velocità della barca rispetto alla riva se essa si muove in direzione perpendicolare alle rive del fiume come nella punto (a)?
- (b) Quanto tempo impiega la barca per attraversare il fiume alla velocità determinata nel punto (b)?
- 18.14.** Un aereo vola verso nord a 320 km/h e viene sorvolato da un altro aereo che va verso est alla velocità di 260 km/h. (a) Qual è la componente orizzontale dello spostamento del secondo aeroplano rispetto al primo, 20 minuti dopo che sono passati uno sopra l'altro? E dopo 50 minuti? (b) Qual è la componente orizzontale della velocità dell'aereo che vola verso est rispetto all'aereo che vola verso nord? (c) Rispetto alla Terra la direzione e il verso di questo vettore velocità variano?
- 18.15.** Un transatlantico viaggia a 18 km/h. Un passeggero cammina sul ponte verso poppa alla velocità di 4 m/s. Dopo aver camminato per 30 m egli si gira verso destra e cammina alla stessa velocità verso la murata che ritrova a 12 m dal punto in cui si è girato. (a) Qual è il suo vettore velocità rispetto alla superficie dell'acqua mentre cammina verso poppa? E mentre cammina verso la murata? (b) Disegnare i vettori spostamento relativi al percorso rispetto alla superficie dell'acqua. Qual è lo spostamento totale dal punto di partenza?
- 18.16.** Un aeroplano viaggia verso il luogo di destinazione a 320 km a est dal punto di partenza, e il vento soffia da nord-ovest verso sud-est con una velocità di 50 km/h. Il pilota vuole compiere il volo in 40 minuti. (a) Quale deve essere la rotta? (b) Con quale velocità rispetto all'aria deve volare?
- 18.17.** Un aeroplano vola verso sud ad una velocità rispetto all'aria di 870 km/h, attraversando una corrente d'aria in moto verso est alla velocità di 400 km/h. (a) In che direzione si muove l'aereo rispetto al suolo? (b) Che valore ha la velocità dell'aereo rispetto al suolo? (c) Qual è lo spostamento riferito al suolo, percorso dall'aereo in 15 minuti.
-