

19. SISTEMI DI RIFERIMENTO ACCELERATI

19.1. Sistemi di riferimento accelerati linearmente

Nella prima parte del film *Frames of Reference* (Sistemi di riferimento) abbiamo verificato che le leggi di Newton sono valide in tutti i sistemi di riferimento che si muovono l'uno rispetto all'altro con velocità costante. Tali leggi saranno ancora valide in un sistema di riferimento in moto accelerato rispetto a un altro?

Nella seconda parte del film *Frames of Reference* (Sistemi di riferimento) Hume e Ivey eseguono un esperimento con la cinepresa di nuovo collegata al carrello come è illustrato nella Fig. 19.1, in modo da registrare la caduta della sfera nel sistema di riferimento del carrello. Ma questa volta il carrello è collegato per mezzo di un filo e una carrucola a un sistema di pesi che viene abbandonato a se stesso; di conseguenza il carrello accelera finché i pesi non raggiungono il pavimento.



Fig. 19.1. Il dott. Ivey sta collegando la cinepresa al carrello in modo che riprenda il moto di caduta della sfera nel sistema di riferimento del carrello in moto.

La Fig. 19.2 mostra la traiettoria della sfera osservata attraverso la cinepresa in moto insieme al carrello che sta accelerando: è chiaro che la sfera si muove all'indietro mentre cade e atterra dietro il piede della perpendicolare abbassata dall'elettromagnete.

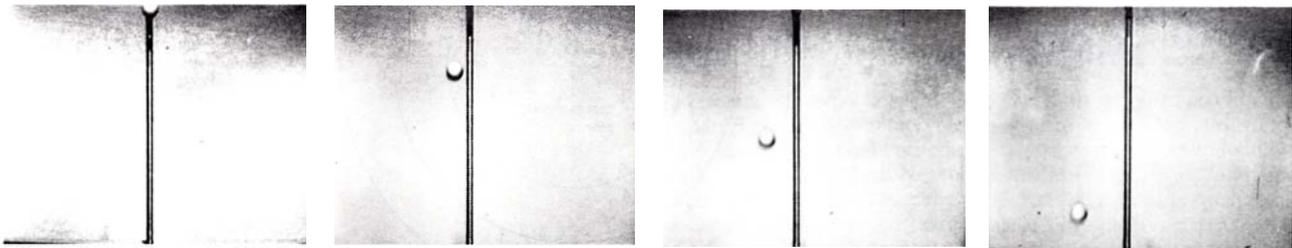


Fig. 19.2. La traiettoria di una sfera che cade su un carrello soggetto ad accelerazione, vista da una cinepresa ad alta velocità in moto insieme al carrello.

Se le leggi di Newton fossero valide nel sistema di riferimento del carrello accelerato, dovrebbe esistere una forza orizzontale che spinge la sfera verso sinistra. Ma tale forza non esiste e in realtà se avessimo ripreso la sfera con una cinepresa fissa nel sistema di riferimento della Terra, la traiettoria avrebbe avuto l'andamento osservato nell'esperimento con il carrello in moto con velocità costante. Da ciò si deduce che le leggi di Newton non sono valide in un sistema di riferimento accelerato. Per conservare la validità delle leggi di Newton nel sistema di riferimento accelerato del carrello, dobbiamo inventare una forza, detta *forza fittizia* o *forza apparente*, per spiegare la spinta all'indietro esercitata sulla sfera.

Tutti ci siamo trovati in sistemi di riferimento accelerati. Quando sediamo in un'automobile che sta accelerando, avvertiamo che lo schienale del sedile ci spinge in avanti e tuttavia noi non acceleriamo rispetto all'automobile. Per mantenere la validità della legge di Newton nel sistema di riferimento dell'automobile, possiamo inventare una forza uguale e opposta che, diciamo, ci spinge contro il sedile in modo che la forza risultante che si esercita su di noi sia nulla. Ciò può avere per noi ancora più senso quando vediamo una palla libera di rotolare sul pavimento dell'automobile accelerare verso la parte posteriore o anteriore a seconda che il mezzo dove ci troviamo stia accelerando o frenando.

Per un osservatore solidale con la Terra non è necessario inventare forze per spiegare ciò che egli vede e avverte. Quando un'automobile accelera o frena, tutte le sue parti compresi il pavimento, i sedili e i passeggeri assicurati ai sedili accelerano o frenano. Una palla priva di attrito che poggia sul pavimento dell'automobile mantiene la propria velocità rispetto al suolo poiché il veicolo non esercita una forza su di essa.

Quando l'automobile accelera in avanti o indietro (frena), la palla accelera nel verso opposto per un osservatore seduto nell'automobile.

Quesiti

- 19.1. Un ascensore sta scendendo con decelerazione a : quale sarà il peso apparente di una persona di massa m posta all'interno dell'ascensore? E se l'ascensore salisse con accelerazione a ?
- 19.2. Un ascensore scende a velocità costante. Un passeggero estrae dalla tasca una moneta e la lascia cadere. Quali accelerazioni attribuiscono alla moneta (a) il passeggero e (b) una persona in quiete rispetto all'ascensore?
- 19.3. Una palla viene lasciata cadere da ferma da una altezza di 4 m rispetto al pianale di un vagone ferroviario soggetto in direzione orizzontale ad una accelerazione costante di 2 m/s^2 e dotato, nell'istante in cui si lancia la palla (cioè nell'istante in cui parte), di una velocità di 0 m/s .
- (a) Scrivere le equazioni del moto rispetto ad un osservatore che si trovi sul pianale (sistema di riferimento S') e rispetto ad un osservatore che si trovi a terra in prossimità del vagone (sistema di riferimento S).
- (b) Descrivere la traiettoria della palla, cioè dare l'equazione $y = f(x)$, rispetto ad S' e ad S .
- 19.4. Un uomo sulla piattaforma di osservazione di un treno che si muove con velocità costante perde una moneta sporgendosi dal finestrino. Descrivere la traiettoria (anche con le equazioni) della moneta vista da:
- (a) l'uomo sul treno, (b) una persona che si trova al suolo vicino alle rotaie, (c) un uomo su un secondo treno in movimento su un binario parallelo al primo e in verso opposto.
- 19.5. Un autobus viaggia alla velocità di 108 km/h , il guidatore pigia sui freni e riesce ad imprimere al mezzo una forza di attrito costante che permette di fermare il mezzo in 5 s :
- (a) a quale accelerazione in avanti saranno soggetti i passeggeri rispetto all'autobus? anche l'autista sarà soggetto a tale forza?
- (b) se l'autobus subisce un urto frontale con un mezzo pesante fermo sulla strada, molto probabilmente il tempo di decelerazione sarà dell'ordine di 10^{-1} s e la distanza di arresto di 1 m ; a quale decelerazione saranno soggetti i passeggeri? a quale forza un corpo di 60 kg ?
- 19.6. Uno scuola bus (Fig. A) con climatizzatore e finestrini chiusi procede lungo una strada rettilinea. Uno dei bambini tiene legato al suo schienale un palloncino pieno di idrogeno. Un osservatore al lato della strada vede che il filo del palloncino forma un angolo $\theta = 30^\circ$ con la verticale nella direzione del moto. Il guidatore sta accelerando o frenando l'autobus? Di quanto? E ad un osservatore posto sull'autobus stesso come apparirebbe il palloncino?
- 19.7. Mentre un autobus sta viaggiando su una strada rettilinea orizzontale, facciamo rotolare una palla sul pavimento dell'autobus da un fianco all'altro del veicolo. La traiettoria della palla è rettilinea rispetto all'autobus. In seguito facciamo rotolare di nuovo la palla; questa volta la traiettoria è una parabola che si piega verso la parte anteriore dell'autobus. Descrivete il moto dell'autobus in ciascun caso.
- 19.8. Un pendolo semplice di lunghezza l si trova dentro un ascensore. Calcolare il periodo del pendolo nei seguenti casi:
- (a) l'ascensore scende con velocità costante;
- (b) l'ascensore sale con velocità costante;
- (c) l'ascensore scende con accelerazione costante pari ad a ;
- (d) l'ascensore sale con accelerazione costante pari ad a ;
- (e) l'ascensore scende in caduta libera senza attrito.

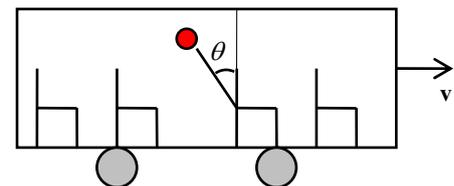


Fig. A

19.2. Sistemi di riferimento rotanti

Quando percorriamo una curva ad alta velocità in automobile, abbiamo la sensazione che agisca una forza dal momento che la porta dell'automobile reagisce spingendo il nostro corpo verso l'interno. Per un osservatore nel sistema di riferimento della Terra, questa spinta è la forza centripeta necessaria per farci descrivere una traiettoria circolare. Se consideriamo questa esperienza nel sistema di riferimento dell'automobile, la situazione diventa interessante. Stando all'interno dell'automobile ci sentiamo spingere

verso l'esterno della curva da una misteriosa forza che agisce su di noi, ma noi non ci muoviamo rispetto all'automobile perché la porta dell'automobile ce lo impedisce. Per conservare la validità della legge di Newton, inventiamo una forza uguale e opposta, detta *forza centrifuga*. Questa forza, nel nostro ragionamento, viene equilibrata dalla forza centripeta e così si spiega perché rimaniamo in quiete rispetto all'automobile.

Una situazione analoga è illustrata nella Fig. 19.3, un altro fotogramma tratto dal film *Frames of Reference* (Sistemi di riferimento). Mostra un disco a ghiaccio secco privo di attrito in quiete su un tavolo situato su una «giostra» che ruota di moto circolare uniforme rispetto alla Terra.

Possiamo vedere che, per mantenere il disco in quiete, è stato attaccato a un elastico trattenuto dallo sperimentatore. È chiaro che l'elastico allungato tira il disco verso l'interno. Per spiegare il fatto che il disco è in quiete sulla giostra abbiamo bisogno della forza centrifuga per equilibrare questa forza diretta verso l'interno.

Per un osservatore a terra il disco si muove di moto circolare uniforme. Quando il disco viene abbandonato a se stesso, prosegue di moto rettilineo secondo una direzione tangente alla traiettoria circolare, come è previsto dal principio d'inerzia di Galilei. Per un osservatore che ruota, ora il disco è soggetto a una forza fittizia che l'accelera.

Un sistema di riferimento in cui sono valide le leggi di Newton è detto sistema di riferimento inerziale. È un sistema di riferimento che è in quiete o si muove a velocità costante. Normalmente, consideriamo la Terra un sistema di riferimento inerziale in quanto in esso le leggi di Newton risultano valide. Ma se la Terra ruota, come può essere un sistema di riferimento inerziale?

19.3. Approfondimenti sui sistemi rotanti

Tra i sistemi di riferimento non inerziali, consideriamo quelli rotanti. Questi vengono esaminati a parte perché sono caratterizzati da un'accelerazione centripeta diretta verso il centro. Prenderemo in considerazione due sistemi di riferimento S e S' , il primo inerziale e il secondo rotante, quindi non inerziale.

Il sistema S è solidale con la Terra. Il sistema S' è formato da una piattaforma rotante con velocità costante, sopra la quale c'è un corpo di massa m vincolato alla piattaforma con un elastico (Fig. 19.4). In entrambi i sistemi di riferimento S e S' osserveremo (quando la piattaforma inizia a girare) che l'elastico si allungherà per poi rimanere in una posizione di equilibrio, cioè, con tensione dell'elastico costante.

Questo allungamento è spiegabile in due modi: l'osservatore in S dice che è la forza centripeta la causa dell'allungamento dell'elastico; l'osservatore in S' non sa spiegare il perché dell'allungamento, non agendo forze reali, e deve introdurre una forza apparente o fittizia, detta centrifuga (\mathbf{F}_{cf}), dipendente dal sistema di riferimento che non è inerziale, se vuole continuare ad usare le leggi della meccanica in modo semplice. Se non ci fosse l'azione della forza centrifuga non ci sarebbe l'allungamento dell'elastico.

La forza centrifuga è esattamente uguale ed opposta alla forza centripeta (per quanto detto):

$$\mathbf{F}_{cf} = -\mathbf{F}_{cp} \quad [19.1]$$

e

$$|\mathbf{F}_{cf}| = |\mathbf{F}_{cp}| = m\omega^2 r = m \frac{v^2}{r} \quad [19.2]$$

In S : \mathbf{F}_{cp} misurata dall'allungamento dell'elastico è una forza attiva;

In S' : \mathbf{F}_{cf} misurata dall'allungamento dell'elastico è una forza attiva;

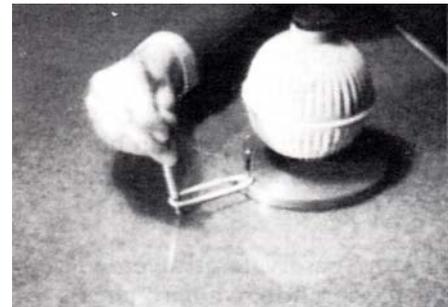


Fig. 19.3. Su una piattaforma ruotante sembra esercitarsi una forza diretta verso l'esterno sul disco a ghiaccio secco privo di attrito trattenuto dall'uomo seduto al tavolo.

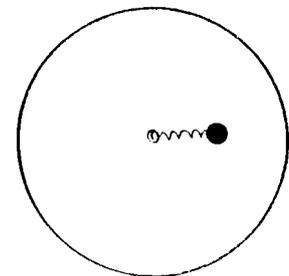


Fig. 19.4.

\mathbf{F}_{cp} data dalla reazione dell'elastico è una forza passiva.

Se poi togliamo l'elastico (Fig. 19.5), in S' si nota che oltre la forza centrifuga c' è un'altra forza apparente o fittizia, detta forza del Coriolis, che è direttamente proporzionale alla \mathbf{v}' del corpo e alla velocità angolare di S' , la quale è responsabile dell'incurvamento della traiettoria di un corpo lasciato libero. La sua espressione, piuttosto complicata è:

$$\mathbf{F}_{Coriolis} = -2m\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v}'. \quad [19.3]$$

Essa è una forza perpendicolare sia a $\boldsymbol{\omega}$ che a \mathbf{v}' e di intensità proporzionale a ω e a v' .

In sintesi:

$$m\mathbf{a}' = \mathbf{F}_{reale} + \mathbf{F}_{cf} + \mathbf{F}_{Coriolis} \quad [19.4]$$

e

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a}_{reale} + \mathbf{a}_{cf} + \mathbf{a}_{Coriolis} \quad [19.5]$$

Da notare che la forza del Coriolis interviene solo con una velocità angolare del sistema S' unita all'azione di una \mathbf{v}' .

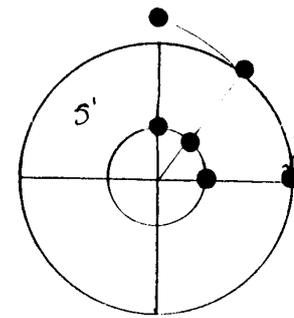


Fig. 19.5.

Quesiti

-
- 19.9. Nella descrizione dell'automobile che percorre una curva, da dove si origina la forza che agisce sull'automobile?
- 19.10. Perché una persona che sta in piedi su di una piattaforma, che ruota a velocità costante, è costretta a piegarsi verso il centro di rotazione se vuole mantenere l'equilibrio?
- 19.11. Descrivere la situazione presentata nell'esercizio precedente dal punto di vista della persona che sta sulla piattaforma.
- 19.12. Si faccia riferimento al film *Frames of Reference* (Sistemi di riferimento). Un disco senza attrito è posto su una piattaforma ruotante ed è attaccato ad un estremo di un elastico avente l'altro estremo fissato sulla piattaforma. Descrivere tutte le **forze** agenti sul disco e lo **stato** del disco rispetto ad un osservatore solidale con la piattaforma.
- 19.13. Con riferimento alla situazione del quesito precedente, descrivere tutte le **forze** agenti sul disco e lo **stato** del disco rispetto ad un osservatore inerziale esterno alla piattaforma.
- 19.14. Al disco del quesito 19.12 viene tolto il vincolo dell'elastico. Descrivere tutte le **forze** agenti sul disco e lo **stato** del disco rispetto ad un osservatore solidale con la piattaforma.
- 19.15. Al disco del quesito 19.12 viene tolto il vincolo dell'elastico. Descrivere tutte le **forze** agenti sul disco e lo **stato** del disco rispetto ad un osservatore inerziale esterno alla piattaforma.
- 19.16. Uno studente di massa 75 kg su una ruota da luna park ruotante ad alta velocità ha un peso apparente (risultante delle forze verticali agenti su di lui) di 630 N nel punto più alto.
- (a) Quale sarà il suo peso apparente nel punto più basso?
- (b) Quale sarà il suo peso apparente nel punto più alto della ruota se questa raddoppiasse la propria velocità?
- 19.17. Un corpo di massa 50 kg ruota attorno ad un punto O legato ad esso per mezzo di una fune senza peso, inestensibile, di lunghezza 10m, in grado di sopportare una tensione massima di 8 kN. Qual è la velocità massima consentita al corpo? [R.40 m/s].
-

19.4. La rotazione della Terra e sue conseguenze

Anche la Terra è un sistema di riferimento rotante, quindi non inerziale. Come influisce la rotazione della Terra sui fenomeni fisici che avvengono sulla sua superficie?

Facendo riferimento alla Fig. 19.6, sia

- \mathbf{a}_{cf} = accelerazione centrifuga
- d = distanza dall'asse terrestre
- ϕ = latitudine
- R = raggio terrestre

allora

$$|\mathbf{a}_{cf}| = \omega^2 \cdot d = \frac{v^2}{d} \quad [19.6]$$

con $d = R \cos \phi$.

Nella Fig. 19.7 viene mostrato, in modo amplificato, come il filo a piombo, essendo soggetto sia a \mathbf{g} che ad \mathbf{a}_{cf} , non è diretto verso il centro della Terra ma ha una direzione risultante, somma vettoriale delle due accelerazioni.

$$\mathbf{a}' = \mathbf{g} + \mathbf{a}_{cf} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F}' = \mathbf{P} + \mathbf{F}_{cf} \quad [19.7]$$

Sappiamo che g varia dal polo all'equatore passando dal valore $g = 9.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ al valore $g = 9.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, questo tuttavia è dovuto a due motivi:

- 1) la variazione della \mathbf{a}_{cf} ;
- 2) la Terra è schiacciata ai poli.

Il che significa che gli effetti della rotazione della Terra sono visibili solo con esperienze abbastanza accurate.

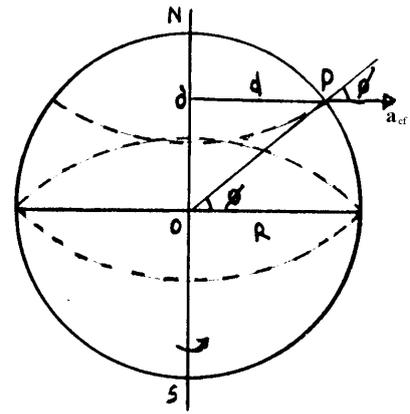


Fig. 19.6.

19.5. Le leggi di Newton e la rotazione della Terra (il pendolo di Foucault)

Per cercare la risposta alla domanda che abbiamo posto alla fine del paragrafo 19.2 potremmo chiederci: «Siamo in un sistema di riferimento ruotante o sono il Sole e le stelle fisse che stanno ruotando intorno alla Terra?» Le leggi di Newton sono «realmente» valide quando usiamo la Terra come sistema di riferimento oppure sono più precise in qualche altro sistema di riferimento rispetto al quale la Terra sia in rotazione? Se la Terra fosse realmente un sistema di riferimento accelerato o non-inerziale, dovremmo essere in grado di determinarlo notando che, per spiegare i moti dei corpi rispetto alla Terra, è necessario introdurre forze fittizie.

Chiaramente queste forze fittizie devono essere molto piccole perché altrimenti le avremmo osservate nei nostri esperimenti.

Un corpo di massa 1 kg per ruotare intorno all'equatore dovrebbe essere soggetto a una forza centripeta se la Terra fosse in rotazione. Possiamo calcolare il modulo di questa forza e si ottiene:

$$F = m \cdot a = m \cdot 4\pi^2 R/T^2 = 1\text{kg} \times (3 \times 10^{-2} \text{ N/kg})$$

ossia circa 0.003 volte la forza di gravità. Per verificare se è necessaria realmente una forza pari a 3 millesimi della forza peso per produrre questo moto, si deve ricorrere a un esperimento più preciso di quelli che abbiamo eseguito per determinare la legge del moto di Newton.

Il fisico francese Leon Foucault (1819-1868) eseguì un esperimento, diventato famoso, per dimostrare che la Terra ruota attorno al proprio

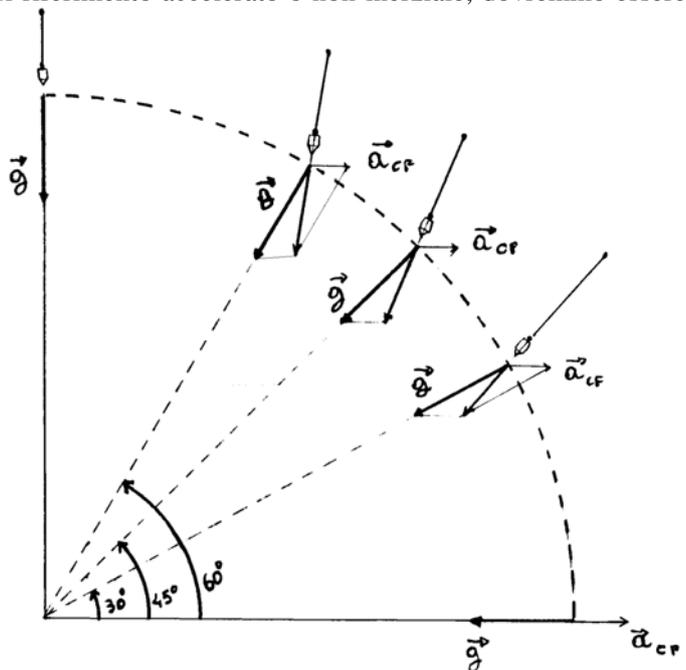


Fig. 19.7.

asse in un sistema di riferimento in cui sono valide le leggi di Newton. Per eseguire l'esperimento di Foucault costruiamo un pendolo con l'estremo superiore fissato saldamente a un soffitto molto alto (un pendolo del genere si può osservare in qualche museo della scienza). Per avviare il pendolo si allontana leggermente la pallina pesante dalla posizione di riposo, legandola con un filo nella nuova posizione, poi la si abbandona a se stessa, bruciando il filo per evitare la forza laterale che di solito si imprime quando si abbandona a se stesso un corpo con la mano. Il pendolo oscilla avanti e indietro descrivendo un moto che è, con ottima approssimazione, rettilineo. In un sistema inerziale il pendolo dovrebbe continuare a oscillare indefinitamente nel piano contenente la traiettoria di oscillazione e il punto di sospensione del pendolo (Fig. 16.6 a pag. 191). Non esiste alcuna componente della forza perpendicolare a questo piano e la palla non ha alcuna componente iniziale della velocità perpendicolare al piano, quindi la legge del moto di Newton prevede che il pendolo continui a oscillare indefinitamente in questo piano.

Quando eseguiamo questo esperimento, troviamo che il pendolo si comporta proprio come abbiamo previsto: rimane nel piano nel quale aveva iniziato il moto e ubbidisce alla seconda legge del moto di Newton. Se aspettiamo abbastanza a lungo, ore anziché minuti, troviamo che il piano di oscillazione ruota rispetto alla sua posizione iniziale. In realtà, se eseguiamo questo esperimento al Polo Nord, troveremo che in 24 h il piano di oscillazione è ruotato di 360° rispetto a noi (Fig. 19.8).

Questo esperimento fornisce la prova che la Terra ruota davvero e che i sistemi di riferimento solidali con essa sono sistemi di riferimento ruotanti (accelerati) rispetto alle stelle lontane. Ma dimostra anche che è impossibile rilevare gli effetti della rotazione della Terra in esperimenti di laboratorio. Un pendolo di Foucault lungo 10 m ha un periodo di circa 6.3 s e compie quasi 14000 oscillazioni in un giorno. Se il pendolo potesse oscillare completamente libero nel sistema inerziale, il piano di oscillazione apparirebbe ruotare di un angolo di circa 0.026° durante ogni oscillazione al Polo Nord.

Questi esperimenti dimostrano che, sebbene la Terra sia davvero un sistema di riferimento ruotante (accelerato) nel quale la legge di Newton non è esattamente valida, per tutti gli esperimenti, tranne che per i più precisi, possiamo trascurare gli effetti della rotazione della Terra. Se vogliamo però la precisione massima possibile, dobbiamo applicare la legge di Newton nel sistema di riferimento delle stelle fisse anziché in quello della Terra.

La rotazione della Terra non influenza la maggior parte degli esperimenti di laboratorio come abbiamo visto, tuttavia dà origine a una forza fittizia di cui debbono tenere conto i meteorologi e altri che si occupano del moto di grandi masse d'aria e di tutta la materia che percorre grandi distanze sulla superficie della Terra. Consideriamo un missile a lunga gittata lanciato dal Polo Nord verso l'equatore. Nel sistema di riferimento delle stelle fisse, se si trascura la sua salita e caduta, il missile si muove di moto rettilineo. Ma, mentre il missile si muove verso sud, dal Polo Nord verso l'equatore, i punti della superficie terrestre si muovono a velocità sempre crescente da ovest verso est. Di conseguenza, il missile toccherà il suolo in un punto a ovest della longitudine lungo la quale è stato lanciato. Nel sistema di riferimento della Terra, la traiettoria del missile curva verso ovest, come se una forza lo deviasse verso destra rispetto alla sua traiettoria iniziale. Questa forza fittizia responsabile di questa deviazione è detta forza di Coriolis.



Fig. 19.8. Un pendolo di Foucault al Polo Nord. Il pendolo oscilla muovendosi di moto quasi rettilineo mentre la Terra ruota sotto di esso. Per un osservatore sulla Terra il piano di oscillazione del pendolo sembrerebbe ruotare.

Un effetto analogo si può osservare su una superficie piana. Nella Fig. 19.9(a) si vede un disco di cartone fissato con nastro adesivo sul piatto di un giradischi. Mentre il piatto girava a velocità di rotazione costante, abbiamo tracciato una «retta» dal centro al bordo esterno del disco e il risultato è presentato nella Fig. 19.9(b). Potreste provare a eseguire voi stessi questo esperimento.

19.6. La caduta dei gravi e la rotazione della Terra

Essendo anche la Terra un sistema di riferimento rotante, quindi non inerziale, anche i corpi in movimento sulla Terra dovrebbero essere soggetti ai fenomeni prima elencati. È questo il caso della caduta dei gravi. Infatti Galilei, secondo quello che ci viene detto provò a lasciar cadere dall'alto della torre di Pisa un corpo di massa m in caduta libera senza attrito. Teoricamente il corpo sarebbe dovuto cadere alla base della torre in direzione perpendicolare alla superficie terrestre. Invece si notò che il corpo cadeva in avanti verso est rispetto al punto previsto (Figg. 19.10 e 19.11). Ad esempio Fireich nel 1833 a Friburgo lasciando cadere in una miniera un corpo da una altezza $h = 158.5$ m notò, in assenza di vento o di altri fattori che ne potessero deviare la traiettoria, uno spostamento Δx di 28.3 mm. Questo è spiegabile da un osservatore su un sistema di riferimento inerziale, ad esempio le stelle, col fatto che, dato che il corpo ha una velocità iniziale $v_p = \omega(R_T + h)$, nello stesso tempo la Terra si sarà spostata con una velocità v_H tale che $v_H = \omega \cdot R_T$. Quindi il corpo avrà una distanza maggiore dal centro della Terra ed è per questo che il corpo cadrà più in là, come nelle due figure.

Un osservatore sulla Terra, quindi in S' , per spiegare la deviazione verso est deve far intervenire la forza del Coriolis.

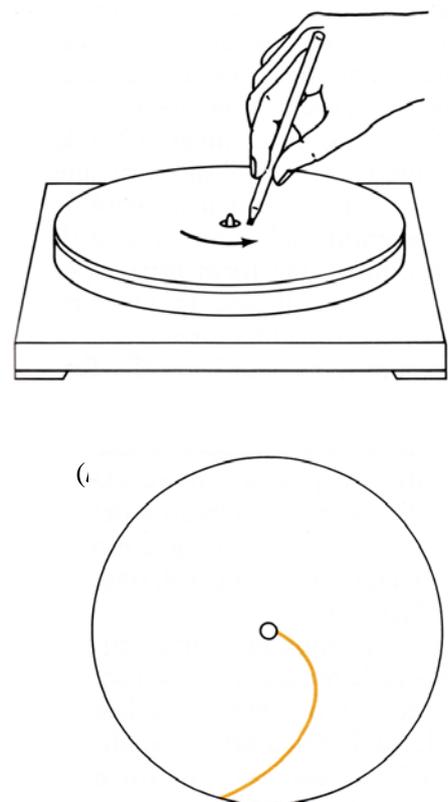


Fig. 19.9. (a) Viene tracciata una linea muovendo un pennarello lungo una retta su un disco di cartone ruotante. (b) La linea risultante sul disco di cartone.

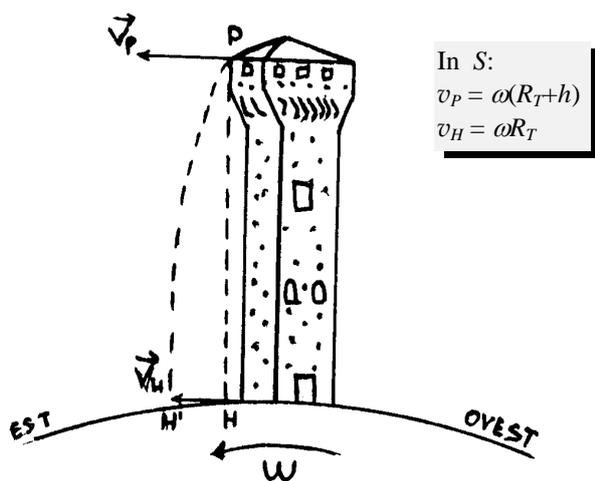


Fig. 19.10.

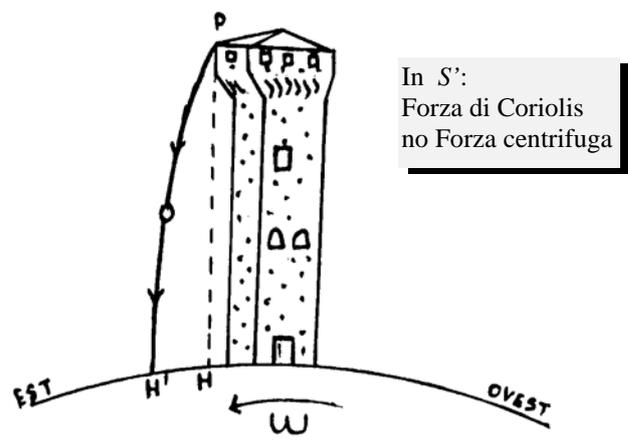


Fig. 19.11.

Quesiti

- 19.18. (a) Spiega perché la «retta» tracciata sul disco di cartone nella figura 19.8 non è realmente una retta.
 (b) Come muovereste il pennarello sulla superficie del piatto ruotante in modo che tracci realmente una retta sul disco di cartone?
- 19.19. Un cannone a lunga gittata è situato nell'emisfero settentrionale. Volete colpire un bersaglio situato a nord del cannone. In quale direzione dovrete puntare il cannone?
- 19.20. Un pendolo di Foucault non presenta variazione del piano di oscillazione sull'equatore della Terra. Ciò significa che l'equatore della Terra è un sistema di riferimento inerziale?
- 19.21. Quale dovrebbe essere il periodo di rotazione della Terra intorno al suo asse perché la gravità risultante ($\mathbf{g} + \mathbf{a}_{cf}$) fosse zero all'equatore, cioè perché, trovandoci da quelle parti, si fluttuasse sulla superficie terrestre, privi di peso?
- 19.22. La Terra, oltre che su se stessa, ruota anche attorno al Sole. Calcolare l' a_{cf} dovuta a questo moto detto di rivoluzione; distanza Terra-Sole = 149.6×10^6 km; il periodo è noto. Qual è il rapporto con l' a_{cf} , in un punto della Terra (es. equatore), dovuta al moto di rotazione della Terra.
- 19.23. Se una palla viene abbandonata a se stessa dalla sommità di una torre molto alta e lasciata cadere in un lungo tubo verticale vuoto, la palla tocca il suolo in un punto situato lievemente a est del piede della verticale abbassata dal punto di partenza al suolo.
 (a) Spiegare in modo qualitativo perché la palla in realtà tocca il suolo in un punto situato lievemente a est del punto da cui è stata lasciata cadere.
 (b) Supponete che una palla sia abbandonata a se stessa dalla sommità di una torre alta 100 m che si innalza sull'equatore. A che distanza dal piede della perpendicolare abbassata dal punto di partenza al suolo ci attendiamo che la palla tocchi il suolo? (Supponete che la resistenza dell'aria sia trascurabile.).
-

19.7. Le leggi di Newton e il moto di un veicolo spaziale senza propulsione.

Quando un veicolo spaziale si muove all'esterno dell'atmosfera terrestre con i motori spenti, la forza gravitazionale è l'unica forza che agisce su di esso. L'accelerazione del veicolo spaziale sarà la stessa se si avvicina alla Terra, se si allontana oppure se le ruota intorno, perciò il veicolo spaziale è un sistema di riferimento accelerato. Un astronauta che esegue esperimenti all'interno del veicolo dovrebbe inventare forze fittizie per rendere valide le leggi di Newton? In altre parole, il sistema di riferimento in un veicolo spaziale accelerato è analogo a quello presente in un'automobile accelerata?

Come sappiamo, una palla sul pavimento di un'automobile che sta accelerando rotola verso la parte posteriore del veicolo. Nei film o nei programmi televisivi che mostrano l'interno di un veicolo spaziale, si vede spesso che oggetti lasciati a mezz'aria vi rimangono: non variano la loro posizione rispetto al veicolo spaziale. Se il corpo riceve una lieve spinta, esso si allontana a velocità costante. Un oggetto tirato con una forza costante (come il disco a ghiaccio secco nella Fig. 10.9 a pag. 140) si muove con accelerazione costante. La legge del moto di Newton sembra quindi essere valida in un veicolo spaziale in moto senza propulsione e pare che non sia necessario introdurre forze fittizie. Quali sono allora le cause della differenza di comportamento fra un'automobile che sta accelerando e un veicolo spaziale che si muove senza propulsione, accelerato solo dalla forza gravitazionale?

La forza che accelera un'automobile agisce soltanto sull'automobile e sui corpi che interagiscono in qualche modo con l'automobile. Una persona seduta nell'automobile accelera poiché lo schienale del sedile esercita una forza su di essa; un oggetto sul pavimento dell'automobile accelera a causa della forza di attrito. Tuttavia non si esercita alcuna forza su un disco a ghiaccio secco privo di attrito all'interno di un'automobile che sta accelerando. Per un osservatore lungo la strada, il disco rimane in quiete o si muove con velocità costante. Una persona nell'automobile vede il disco accelerare verso la parte posteriore dell'automobile e di conseguenza questo osservatore deve introdurre una forza fittizia per spiegare il comportamento del disco. Per mantenere il disco in quiete rispetto all'automobile che sta accelerando è necessaria una forza reale.

In un veicolo spaziale che si muove senza propulsione vicino alla Terra, la forza gravitazionale agisce su tutti i corpi, interagiscono o no con il veicolo spaziale. Inoltre, poiché la forza gravitazionale è proporzionale alla massa, un osservatore sulla Terra vede tutti i corpi muoversi con la stessa accelerazione

del veicolo spaziale. Per gli astronauti all'interno del veicolo, i corpi rimangono in quiete salvo che su di essi non agiscano forze non-gravitazionali. Se gli astronauti esercitano forze sui corpi, questi corpi accelerano come prevede la legge di Newton.

In ogni sistema di riferimento accelerato è necessaria una forza fittizia per rendere valida la legge di Newton. Ma se la forza che causa l'accelerazione è la forza gravitazionale, come avviene in un veicolo spaziale che si muove senza propulsione vicino alla Terra, la forza fittizia equilibra esattamente le forze gravitazionali. Non è necessaria alcuna forza per mantenere i corpi in quiete l'uno rispetto all'altro poiché tutti sono soggetti alla stessa accelerazione. All'interno di un veicolo spaziale, non vengono percepite forze gravitazionali. Il «pavimento» del veicolo cade da «sotto» i piedi di un astronauta con la stessa accelerazione con cui cade l'astronauta. Ecco perché si dice che gli astronauti sono *privi di peso* (o in uno stato di *imponderabilità*). Per gli osservatori sulla Terra, il peso degli astronauti nel veicolo spaziale non è nullo: è uguale al prodotto della loro massa per l'intensità del campo gravitazionale nella posizione che occupano nello spazio.

Quesiti

- 19.24.** Un veicolo spaziale si muove in un'orbita circolare vicina alla superficie della Terra e ha i motori spenti. Qual è l'accelerazione verso il centro della Terra di ciascuno dei corpi seguenti?
- (a) il veicolo spaziale stesso;
 - (b) un astronauta che «galleggia» liberamente all'interno del veicolo spaziale;
 - (c) una palla da baseball che un astronauta tiene in mano.
- 19.25.** Nel centro del veicolo spaziale descritto nel quesito precedente una massa di 2.0 kg è in quiete. Un astronauta esercita sulla massa una trazione di 10 N. A quale accelerazione è soggetta la massa?
-

Problemi di fine capitolo

- 19.26.** Alcuni, parlando di un astronauta che rientra nell'atmosfera, affermano che il suo peso aumenta di parecchie volte. Noi affermiamo che un astronauta, prima di rientrare nell'atmosfera, è privo di peso.
- (a) Queste affermazioni hanno senso alla luce della definizione di peso come della «forza gravitazionale che agisce su un corpo»?
 - (b) Che cosa significa «parecchie volte il proprio peso» o «privo di peso» nell'affermazione precedente?
- 19.27.** Un veicolo spaziale sta procedendo lungo la sua traiettoria dalla Terra alla Luna. Durante la prima parte del viaggio la forza gravitazionale esercitata dalla Terra sul veicolo spaziale è maggiore della forza gravitazionale della Luna. In seguito, quando il veicolo spaziale è molto più vicino alla Luna che alla Terra, la forza gravitazionale esercitata dalla Luna è maggiore della forza gravitazionale della Terra. Nel romanzo di fantascienza *Dalla Terra alla Luna* scritto oltre cent'anni fa da Jules Verne, i suoi astronauti cadevano dalla parte posteriore alla parte anteriore del veicolo spaziale quando questo passava per il punto dello spazio in cui la forza gravitazionale della Luna e quella della Terra esercitate sul veicolo spaziale diventavano uguali. Verne aveva una conoscenza corretta della fisica? Spiegate che cosa pensate che accada agli astronauti nel veicolo spaziale quando essi passano per quel punto dello spazio.
- 19.28.** Supponete di essere su una bilancia in un ascensore. Quando l'ascensore è in quiete, il vostro peso è 600 N. Quando l'ascensore parte verso l'alto, notate che il vostro peso aumenta a 660 N e dopo 1 o 2 secondi, il vostro peso è di nuovo 600 N. Quando l'ascensore rallenta mentre si avvicina al piano che avete scelto, il vostro peso sembra scendere a 540 N e dopo che l'ascensore si è fermato, il vostro peso è di nuovo 600 N.
- (a) Spiegate perché il vostro peso sembra variare come fa durante la vostra corsa in ascensore.
 - (b) Qual è l'accelerazione dell'ascensore quando parte e quando si arresta?
 - (c) Quale sarebbe il vostro peso nel sistema di riferimento di un ascensore in caduta libera?
-