

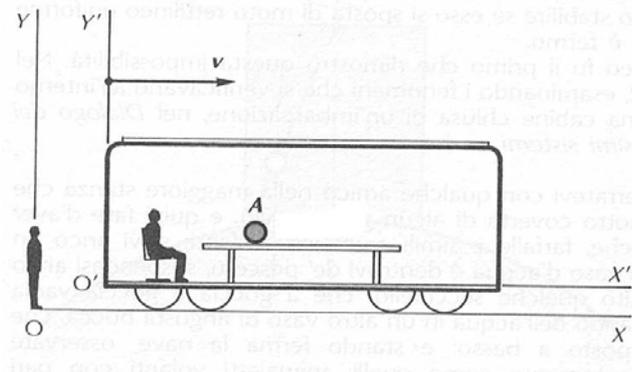


SISTEMI DI RIFERIMENTO INERZIALI E NON INERZIALI A GARDALAND

Scopo dell'esperimento Individuare sulle attrazioni di Gardaland sistemi di riferimenti inerziali e non inerziali.

Richiami teorici. Ci si chiede se le leggi della dinamica che governano il moto dei corpi sono valide per tutti i sistemi di riferimento. Dimostreremo che queste leggi valgono soltanto rispetto ai sistemi di riferimento che si muovono di moto rettilineo uniforme.

Sistemi inerziali. Confrontiamo un sistema di riferimento fisso con uno in moto rettilineo uniforme. Per esempio la Terra con un vagone in moto rettilineo uniforme con velocità v rispetto alla Terra. Supponiamo inoltre che una palla A (vedi figura) sia ferma su un tavolo del vagone e che due osservatori, uno O fisso con la terra e l'altro O' fisso col vagone la osservino.



Se il treno è su un rettilineo e non accelera né frena, la nostra palla continuerà a rimanere ferma per noi ed a correre come il treno per chi ci vede da terra. Per entrambi gli osservatori la palla verifica il principio di inerzia:

"La palla essendo soggetta solo a forze equilibrate, cioè a forze la cui risultante è nulla (la forza peso e la forza di sostegno del tavolo), persevera nel suo stato di quiete (per l'osservatore sul treno) o di moto rettilineo uniforme (per l'osservatore a terra)".

Pertanto la legge di inerzia se è valida per O , lo è anche per O' , ossia per entrambi gli osservatori in movimento rettilineo uniforme.

Consideriamo la legge fondamentale $F = ma$. Poiché la legge di inerzia non è che una conseguenza della legge fondamentale (infatti se $F = 0$ anche $a = 0$) anche quest'ultima legge trova la sua verifica in ogni sistema di riferimento in moto rettilineo uniforme. Supponiamo che la palla venga accelerata da una forza, prima con vagoni il movimento con velocità uniforme v rispetto alla Terra, poi con vagoni fermi. Poiché il moto del corpo rispetto ai due osservatori quando il vagoni è in moto si distingue solo per una differenza di velocità v costante, l'accelerazione è la stessa per entrambi gli osservatori, ossia è un invariante:

$$(1) \quad a' = a$$

Ne segue che la legge fondamentale $F = ma$ ha la stessa forma sia per entrambi gli osservatori in movimento rettilineo uniforme. Discorso analogo vale per il terzo principio. Dunque, le leggi fondamentali della dinamica sono valide in un sistema di riferimento che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto ad uno fisso. Un tale sistema si denomina **sistema inerziale**.

Ovviamente, di sistemi che si muovono di moto rettilineo uniforme rispetto ad un sistema fisso ve ne sono infiniti. Allora si può enunciare il cosiddetto principio di relatività galileana.

Tutti i fenomeni fisici avvengono allo stesso modo nei sistemi inerziali.

In termini più familiari, il sopraddetto principio afferma che le leggi fisiche risultano le stesse per chi le sperimenta in un laboratorio fisso e per chi le analizza in un qualsiasi laboratorio in moto rettilineo uniforme.

Pertanto se le leggi della meccanica hanno lo stesso aspetto in tutti i sistemi inerziali nel vagone che si muove di moto rettilineo uniforme non si potrà eseguire esperimenti meccanici che permettano di stabilire se esso si sposta o se è fermo, prescindendo dalla possibilità di guardare fuori dal finestrino. Così, ad esempio, se si trattiene un oggetto e poi lo si lascia cadere su un treno in movimento a velocità costante o se lo si lancia verso l'alto l'oggetto si muove proprio come se il treno fosse fermo.

Sistemi non inerziali. Vediamo come succede quando un sistema non è inerziale. Consideriamo ancora l'esempio del vagone e della palla. Abbiamo già visto che quando il vagone viaggia di moto rettilineo uniforme, se noi siamo i viaggiatori vediamo la palla ferma mentre la persona a terra la vede correre come il treno. Il principio di inerzia è verificato. Però, appena il vagone gira o varia di velocità, si manifestano chiare infrazioni a questa legge. Il tavolo sfugge da sotto la palla, che può anche cadere dal tavolo. Per chi è a terra il treno ha frenato e la palla, che era libera di muoversi, ha continuato a correre indisturbata. Quando il treno ha frenato noi non eravamo più in un sistema di riferimento inerziale dal momento che la palla ha "improvvisamente" cominciato a muoversi sotto l'azione di una forza fittizia (solo applicando una forza alla palla e quindi un'accelerazione è possibile cambiarne la velocità. Chi era a terra non ha ovviamente risentito di tutto questo ed ha continuato a vedere la palla correre liberamente. Il vagone non è più un sistema di riferimento inerziale e la legge d'inerzia non è più valida sul vagone.

In generale un sistema non è inerziale quando ruota o varia di velocità in intensità e direzione. In tal caso, sul corpo, oltre alle accelerazioni impresse dalle forze applicate all'interno del sistema, si manifestano delle accelerazioni dovute alle variazioni di velocità in intensità e direzione del sistema. Queste accelerazioni sono dovute all'esistenza di forze dette apparenti perché nessun ente fisico è responsabile di tali forze. Gli effetti di tali forze vengono sentiti soltanto dagli osservatori che si muovono di moto accelerato; per l'osservatore fermo non esistono. Tutti i giorni sperimentiamo queste forze. Ad esempio quando si viaggia in automobile e si affronta a velocità sostenuta una curva una "forza misteriosa", chiamata *forza centrifuga*, ci spinge verso il finestrino. Per l'osservatore fermo questa forza non esiste poiché per lui il passeggero è sottoposto solamente alla accelerazione centripeta che genera la forza centripeta necessaria a mantenere persona (ed automobile). Nel riferimento *non inerziale* solidale con l'automobile, la persona invece *non è accelerata*, ma subisce, per bilanciare l'effetto della forza centripeta che la tiene vincolata all'automobile, una forza eguale e contraria di carattere *centrifugo*. Tale forza è del tutto **reale** per l'osservatore a bordo del mezzo, tantoché esso ne sperimenterà gli effetti nel caso dovesse perdere l'appiglio con il veicolo (si viene "sbalzati" verso l'esterno della curva).

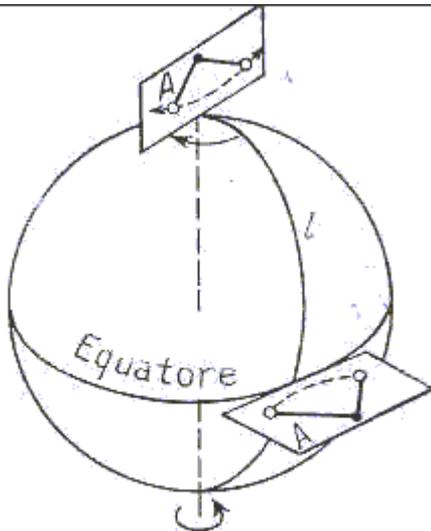
Nei sistemi di riferimento non inerziali il secondo principio della dinamica, per continuare a mantenere la sua validità, deve essere riscritto tenendo anche conto delle forze apparenti e quindi è esprimibile nella forma:

$$(2) \quad \vec{F} + \vec{F}_{app} = m\vec{a}$$

L'esperimento di Foucault. A questo punto nasce un dubbio: la Terra che ruota sul proprio asse e attorno al Sole non è un sistema inerziale! In effetti, a causa della rotazione del nostro pianeta attorno al proprio asse, si manifestano sui corpi su cui sperimentiamo, oltre alle forze che noi applichiamo, le forze apparenti come la forza centrifuga e la *forza di Coriolis* che li deviano dalla loro direzione rettilinea. Tuttavia, per la lentezza con cui la Terra ruota sul proprio asse e attorno al Sole, l'effetto di queste forze è piccolissimo e può quindi normalmente essere trascurato. In effetti non disponiamo mai di un sistema di riferimento inerziale se non con una approssimazione, neppure se consideriamo un sistema di riferimento con origine il Sole. Infatti il Sole con tutto il Sistema solare è in rotazione rispetto alla Galassia. Possiamo solo approssimare il moto circolare del Sole attorno al centro della Galassia, che ha un raggio di migliaia di anni luce, per un breve tratto con una retta e considerare questo come un "buon" sistema di riferimento inerziale.

Ma allora, ci si chiede se esiste un sistema di riferimento rigorosamente inerziale. La risposta è praticamente affermativa; una tale sistema lo si può trovare facendo oscillare un pendolo. Quando un pendolo è messo in moto, esso oscilla su un piano fisso. Infatti, la forza peso $P = mg$ del corpo appeso al filo e la tensione T del filo, che sono le uniche forze applicate al pendolo non possono modificare l'orientamento di questo piano perché giacciono sul piano stesso. Detto in altro modo: poiché la forza di gravità agisce verso il centro della Terra, il pendolo dovrebbe continuare a oscillare (seppur smorzandosi a causa dell'attrito) sullo stesso piano verticale. Non esiste infatti nessuna altra forza che agisca sul pendolo e possa spingerlo lateralmente.

Se le leggi della meccanica fossero perfettamente verificate sulla Terra, questo piano conserverebbe invariata la sua posizione rispetto alla Terra. Invece via via che la Terra ruota sotto il pendolo, il piano di oscillazione, per un osservatore posto sulla Terra, subisce un movimento rotatorio con un periodo dato dalla relazione: $T = 24h / \sin \phi$, dove ϕ è la latitudine del luogo(vedi figura).



La rotazione avviene in senso opposto a quello di rotazione della Terra e quindi in senso orario se osservata dall'alto nell'emisfero boreale mentre è in senso antiorario nell'altro emisfero. E' la forza apparente detta di di Coriolis che fa ruotare il piano di oscillazione del pendolo. Tale forza agisce su tutti i corpi che si muovono su un sistema di riferimento rotante, come la Terra, ad angolo retto rispetto alla loro velocità facendoli deviare verso destra nell'emisfero boreale e verso sinistra nell'emisfero australe. Questa forza ha parecchi effetti pratici: le masse d'aria e d'acqua che si muovono nel nostro emisfero deviano verso destra al contrario di quanto accade nell'emisfero australe, effetto chiaramente visibile osservando le immagini satellitari dei sistemi nuvolosi o più semplicemente l'acqua che, defluendo da un lavandino o da una vasca da bagno, si avvita in senso orario o antiorario a

seconda dell'emisfero; anche le rotte aeree devono tener conto di questo effetto onde evitare di trovarsi spostati ad est o ad ovest rispetto alla meta prestabilita.

Attività sperimentali

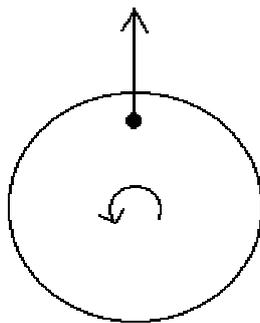
Il pendolo sulla giostra. Se si mette un pendolo su una piattaforma rotante, come una giostra, e lo facciamo oscillare, ci si troveremmo in una situazione analoga a quella della Terra con il vantaggio di accelerare il movimento di rotazione del suo piano di oscillazione. Che cosa dovremmo osservare, stando coi piedi sulla giostra? Il piano di oscillazione del pendolo dovrebbe ruotare lentamente in senso opposto alla giostra con la stessa velocità di rotazione.

Ora, se si osserva il comportamento del pendolo rimanendo fuori dalla piattaforma, con i piedi per terra, lo si osserva oscillare su un piano verticale che, rispetto a noi, resta sempre lo stesso, mentre la giostra gli ruota sotto. Se, ad esempio, lo facciamo oscillare avanti e indietro davanti a noi, continuerà a oscillare così. Ovviamente il punto di sospensione deve essere in grado di lasciare libero il filo senza trascinarlo.

Se osserviamo invece il pendolo stando coi piedi sulla giostra, ci accorgeremo che, mentre la giostra è ferma rispetto a noi (perché noi ci troviamo coi piedi fissi su di essa), il piano di oscillazione del pendolo ruota in senso opposto alla giostra con la stessa velocità di rotazione.

Quindi si è trovato un sistema inerziale. Infatti se si fissa un sistema di tre assi coordinati con l'origine nel Sole collegati alle *stelle fisse*, il piano di oscillazione del pendolo rimane praticamente invariato rispetto a questo sistema di coordinate. In questo sistema, denominato sistema eliocentrico, le leggi della meccanica sono verificate. Inutile dire che anche questo sistema non è perfettamente inerziale perché anche le stelle si muovono una rispetto all'altra.

Altri effetti della forza di Coriolis sulla giostra.



Gli effetti della forza di Coriolis li possiamo provare di persona su una giostra come quelle con una piattaforma su cui ci sono vari cavalli a diversa distanza dal centro. I cavalli vicino al centro di rotazione sono quasi fermi, mentre quelli più lontani hanno velocità lineare maggiore. Questo perché tutti hanno la stessa velocità angolare (cioè fanno gli stessi giri nello stesso tempo) ma hanno velocità lineari diverse, poiché un giro vicino al centro avviene in poco spazio, mentre al bordo possono esserci parecchi metri.

Se stiamo fermi mentre la giostra ruota quello che si sperimenta è solo una forza centrifuga, cioè una forza che è diretta come in figura.

Immaginiamo (figura) sempre una vecchia giostra, ma questa volta supponiamo di voler andare lentamente dal punto B al punto A (rischiando di cadere). Durante il tragitto, mentre mi sposto da B verso A, la mia velocità lineare (che è verso sinistra) deve diminuire; allora sento una forza verso sinistra, come quando, in auto, frenando la mia velocità (che è in avanti) sento una forza che mi spinge in avanti. Questa forza "verso sinistra" si somma ovviamente a quella centrifuga e rende difficile camminare su queste giostre.

Supponiamo adesso di voler tornare lentamente dal punto A al punto B. In questo caso la mia velocità lineare deve aumentare, cioè devo accelerare verso sinistra; allora sento una forza verso destra (come quando in accelero automobile e sento una forza che mi spinge indietro, "tendo a restare indietro" rispetto alla direzione della velocità). In questo caso è facile pensare a questa forza come dovuta al fatto che la giostra ruota sotto i miei piedi e pertanto, se vado in linea retta, in realtà mi troverò spostato più a destra.

