La relatività classica, ovvero la relatività di Galileo Newton

I sistemi di riferimento

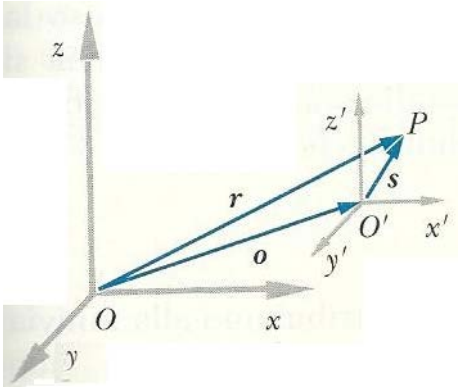
- Il moto di un punto materiale è un concetto relativo e deve essere riferito sempre ad un **S.R.** scelto dall'osservatore. Poiché osservatori differenti possono usare **S.R.** diversi è importante conoscere come sono correlate le osservazioni compiute da osservatori diversi. Il problema da risolvere è il seguente:

<<E' noto il moto del punto materiale P rispetto al riferimento $S'=O'x'y'z'$, cioè sono note in questo sistema, istante per istante, la posizione, la velocità, l'accelerazione del punto P. E' noto il moto di $S'=O'x'y'z'$ rispetto al riferimento $S=Oxyz$. Si vuole conoscere il moto di P rispetto ad $S=Oxyz$, ossia si vuole sapere, istante per istante, la posizione, la velocità e l'accelerazione del punto P rispetto al sistema $S=Oxyz$ >>.

Solo per comodità riterremo $S=Oxyz$ fermo ed $S'=O'x'y'z'$ in moto rispetto ad $S=Oxyz$.

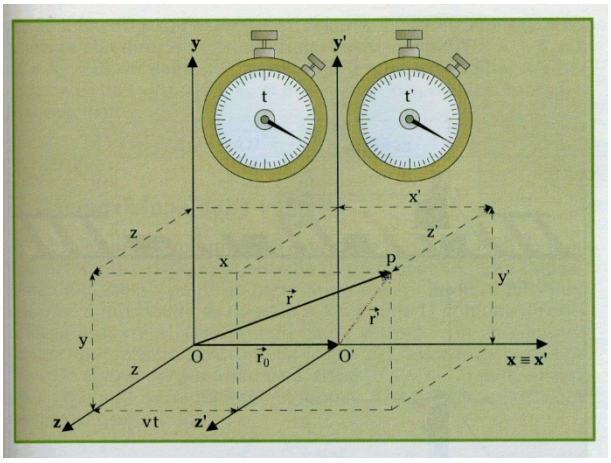
Diremo moto relativo il moto di P rispetto al riferimento mobile S', moto assoluto il moto di **P** rispetto al riferimento fisso $S=Oxyz$ e moto di trascinamento all'istante t il moto di **P** rispetto ad $S=Oxyz$ qualora, a partire da quell'istante, il punto **P** restasse rigidamente collegato col sistema mobile e fosse trascinato dal moto di quest'ultimo.

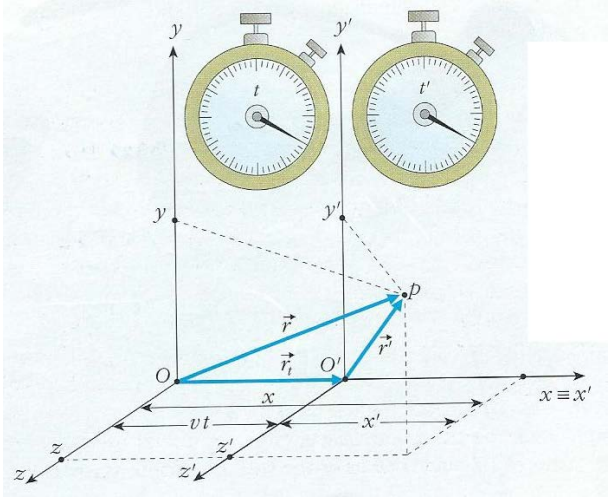
Quindi il moto di trascinamento è il moto del punto materiale rispetto al sistema fisso se riteniamo **P** solidale col sistema mobile. Il moto di trascinamento del punto **P** coincide col moto del sistema mobile rispetto al sistema fisso.



- Il moto assoluto dicesi anche moto composto o moto risultante del moto relativo e del moto di trascinamento che diconsi moti simultanei **o** moti componenti.

- E' soltanto una convenzione chiamare assoluto il moto di **P** rispetto ad S, relativo il moto di **P** rispetto ad S', di trascinamento il moto di S' rispetto ad S. Lo spostamento, la velocità, e l'accelerazione del punto materiale **P** si dicono assoluti**,** relativi**, di** trascinamento a seconda che siano riferiti al moto assoluto, relativo, di trascinamento.





Le trasformazioni galileiane

Due osservatori che si trovino in due distinti sistemi di riferimento attribuiscono al punto in cui si realizza uno stesso evento coordinate diverse. Un osservatore in un sistema di riferimento S assegna al punto **P** tre coordinate x, y, z. Egli individua l'evento con quattro numeri x, y, z, t che chiamiamo coordinate spazio-temporali. Un secondo osservatore, solidale col sistema S' in moto rettilineo uniforme rispetto ad S, caratterizza lo stesso evento con quattro coordinate x', y', z', t' in generale diverse dalle precedenti.

Le relazioni tra le coordinate spazio-temporali di uno stesso evento nei due distinti sistemi di riferimento sono note come trasformazioni galileiane e si basano su due ipotesi:

(1) l'esistenza di un tempo assoluto (2) la reciprocità del moto. La prima ipotesi ammette che è sempre possibile definire il tempo indipendentemente dalla scelta del **S.R.** o dal procedimento di misura. La seconda ipotesi afferma che, dati due sistemi di riferimento S ed S', è indifferente considerare il primo fermo ed il secondo in moto con velocità vettoriale $\vec{v}$ costante, oppure il secondo fermo ed il primo in moto con velocità $-\vec{v}$.

Per trovare le relazioni tra le coordinate supponiamo che per $t = 0$ i due sistemi di riferimento $Oxyz$ ed $O'x'y'z'$ collegati con i due osservatori coincidano e che nello stesso istante il sistema $O'x'y'z'$ cominci a muoversi con velocità vettoriale $\vec{v}$ costante secondo la stessa direzione e lo stesso verso degli assi x ed x'. Fare questo significa considerare due osservatori **S** ed S' inerziali, in moto l'uno rispetto all'altro con velocità vettoriale $\vec{v}$. Individuiamo per **S** un sistema di riferimento formato da una terna di assi cartesiani ortogonali x, y, z ed un altro sistema per S' formato da un'altra terna x', y', z'. Scegliamo le terne in modo che gli assi x ed x' siano paralleli, equiversi e

sovrapposti, che y sia parallelo ed equiverso con y', che z sia parallelo ed equiverso con z'. Supponiamo che all'istante iniziale $\mathbf{t=0}$ le origini delle due terne coincidano ($\mathbf{O \equiv O'}$)

- Introducendo i vettori posizione $\vec{\mathbf{r}}=\mathbf{P-O}=\overrightarrow{\mathbf{OP}}$, $\vec{\mathbf{r}}'=\mathbf{P-O'}=\overrightarrow{\mathbf{O'P}}$, $\vec{\mathbf{r}}_0=\mathbf{O'-O}=\overrightarrow{\mathbf{OO'}}$ che individuano, rispettivamente, la posizione di P rispetto ai riferimenti S ed S' e la posizione di O' rispetto ad S, possiamo scrivere la seguente relazione vettoriale che esprime il vettore posizione $\vec{r}$ come somma vettoriale dei vettori posizione $\vec{\mathbf{r}}'$ ed $\vec{\mathbf{r}}_0$, cioè: $\vec{\mathbf{r}}=\vec{\mathbf{r}}_0+\vec{\mathbf{r}}'$ **[1]** **[2]** $\vec{\mathbf{r}}'=\vec{\mathbf{r}}-\vec{\mathbf{r}}_0$

Ricordando che lo spostamento dell'origine $\mathbf{O'}$ del sistema $S'=O'x'y'z'$ risulta $\vec{r}_0=\vec{v}t$ le precedenti relazioni vettoriali assumono il seguente aspetto scalare:

[3] $\begin{cases} \mathbf{x=x'+vt} \\ \mathbf{y=y'} \\ \mathbf{z=z'} \end{cases}$ $\begin{cases} \mathbf{x'=x-vt} \\ \mathbf{y'=y} \\ \mathbf{z'=z} \end{cases}$ **[4]**

Per puntualizzare che l'orologio di S e quello di S' indicano lo stesso istante, possiamo aggiungere alle precedenti la seguente equazione $\mathbf{t'=t}$ essendo $\mathbf{t}$ il tempo dell'osservatore S e $\mathbf{t'}$ il tempo dell'osservatore S'. Questa quarta equazione, che per il momento potrebbe apparire ovvia e perciò superflua, non lo sarà in seguito. Le seguenti quattro equazioni $\begin{cases} \mathbf{x'=x-vt} \\ \mathbf{y'=y} \\ \mathbf{z'=z} \\ \mathbf{t'=t} \end{cases}$ **[5]** note come equazioni di una trasformazione galileiana, o semplicemente trasformazioni galileiane, mettono in relazione le coordinate spazio-temporali di uno stesso evento in due distinti sistemi di riferimento S ed S', se gli assi cartesiani definiti nei due sistemi sono coincidenti all'istante $\mathbf{t'=t=0}$ e se S'' è in moto rettilineo uniforme rispetto ad S con velocità vettoriale $\vec{v}$ nella direzione comune degli assi x ed x'. Esse ci consentono di individuare la posizione del punto P nel sistema S' quando conosciamo la posizione del punto P rispetto ad S ed il moto di S' rispetto ad S.

L'ipotesi del tempo assoluto è espressa dal fatto che sia nelle trasformazioni dirette che in quelle inverse compare la stessa variabile temporale (cioè il tempo t di un osservatore solidale con S coincide col tempo t' di un osservatore solidale con S', cioè **t=t'**).

Le trasformazioni galileiane applicate alle grandezze cinematiche del moto nel caso di un moto traslatorio rettilineo uniforme

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**. Vogliamo determinare le relazioni che intercorrono tra le misure di una stessa grandezza nei due sistemi inerziali. Due sistemi di riferimento sono inerziali se per essi è valido il principio di inerzia, cioè se S' si muove di moto rettilineo uniforme rispetto ad **S**.

La composizione degli spostamenti

Siano $P(t)$ e $P(t_1)$ le posizioni occupate dal punto mobile agli istanti t e t_1. **Risulta**:

$\vec{r}(t_1) = \vec{r}'(t_1) + \vec{r}_o(t_1)$ = vettore che individua la posizione del punto **P** all'istante t_1

$\vec{r}(t) = \vec{r}'(t) + \vec{r}_o(t)$ = vettore che individua la posizione del punto P all'istante t

Sottraendo membro a membro otteniamo:

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}(t_1) - \vec{r}(t) = \left[\vec{r}'(t_1) - \vec{r}'(t)\right] + \left[\vec{r}_o(t_1) - \vec{r}_o(t)\right] \qquad \textbf{[6]}$$

$\Delta\vec{r}_A = \vec{s}_A$ = spostamento assoluto $\quad \Delta\vec{r}' = \vec{s}_R$ = spostamento relativo

$\Delta\vec{r}_o = \vec{s}_T$ = spostamento di trascinamento

$$\vec{s}_A = \vec{s}_R + \vec{s}_T \qquad \textbf{[7]}$$

<<**Lo spostamento assoluto è uguale alla somma dello spostamento relativo e dello spostamento di trascinamento**>>

Con parole diverse possiamo dire che lo spostamento $\vec{s}_A$ di un punto materiale **P** rispetto ad un sistema di riferimento $Oxyz$ (spostamento assoluto è uguale alla

somma vettoriale dello spostamento $\vec{s}_R$ dello stesso punto materiale rispetto ad un altro sistema di riferimento $O'x'y'z'$ (spostamento relativo) e dello spostamento $\vec{s}_T$ rispetto ad $Oxyz$ che esso subirebbe se fosse trascinato da $O'x'y'z'$ (spostamento di trascinamento).

La legge di composizione degli spostamenti è ancora valida anche se i sistemi $Oxyz$ e $O'x'y'z'$ non sono inerziali.

Legge di composizione delle velocità

Dividendo ambo i membri della [6] per $\Delta t = t_1 - t$ otteniamo: $\frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{r}'}{\Delta t} + \frac{\Delta \vec{r}_o}{\Delta t}$ che, per un intervallo di tempo Δt infinitesimo diventa: $\lim_{x \to \Delta t} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \lim_{x \to \Delta t} \frac{\Delta \vec{r}'}{\Delta t} + \lim_{x \to \Delta t} \frac{\Delta \vec{r}_o}{\Delta t}$ e quindi abbiamo: **[8]** $\vec{v}_A(t) = \vec{v}_R(t) + \vec{v}_T(t)$ cioè <<**la velocità assoluta $\vec{v}_A(t)$ è uguale alla somma vettoriale della velocità relativa $\vec{v}_R(t)$ e della velocità di trascinamento $\vec{v}_T(t)$**>>. La velocità di trascinamento coincide con la velocità vettoriale dell'origine O' che, a sua volta, coincide con la velocità vettoriale costante del sistema mobile rispetto al sistema fisso.

Composizione delle accelerazioni

All'istante t_1 la velocità del punto materiale P ci viene fornita dalla seguente relazione vettoriale: $\vec{v}_A(t_1) = \vec{v}_R(t_1) + \vec{v}_T(t_1)$ **[9]**

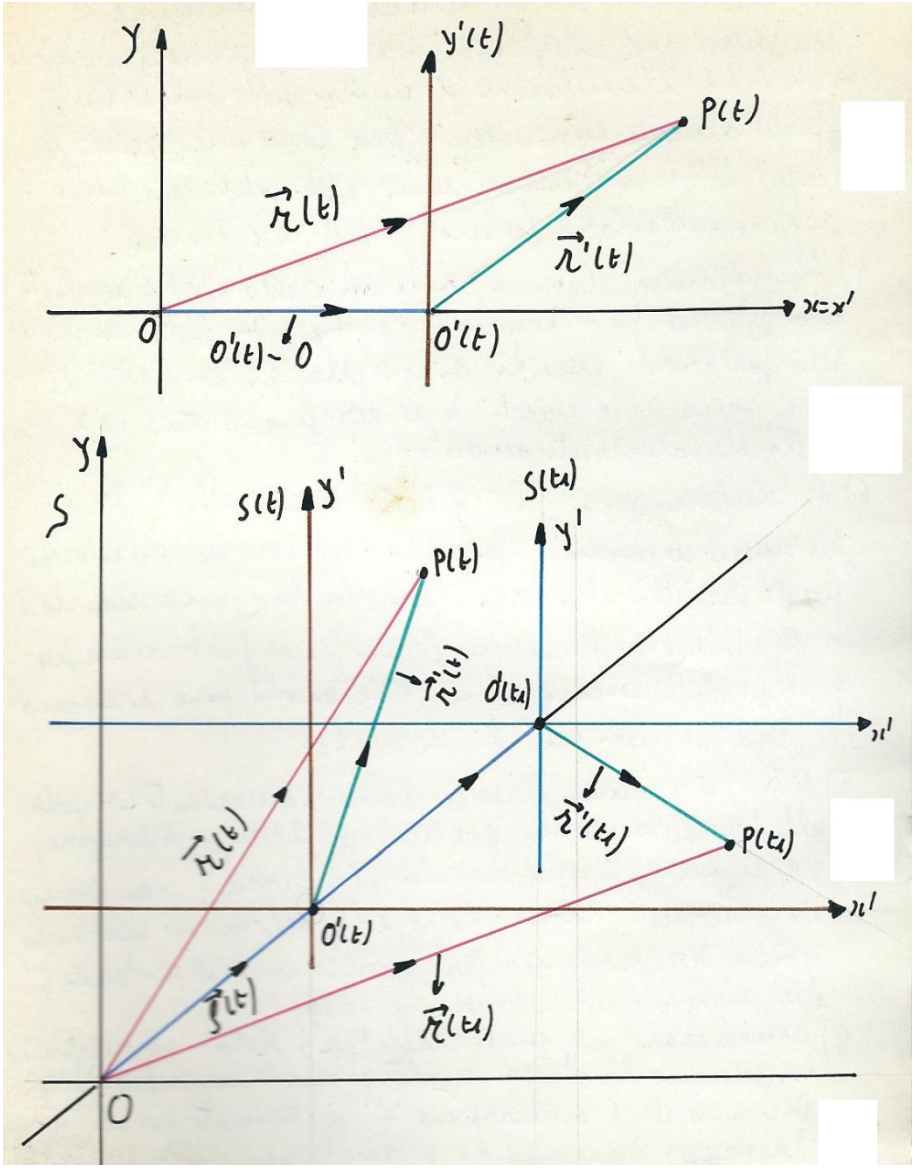
Sottraendo membro a membro la [9] e la [8] otteniamo:

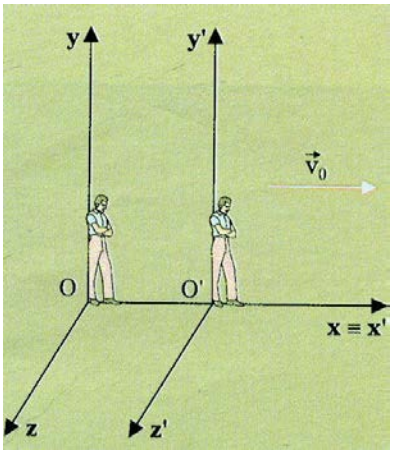
$$\vec{v}_A(t_1) - \vec{v}_A(t) = \vec{v}_R(t_1) - \vec{v}_R(t) + \vec{v}_T(t_1) - \vec{v}_T(t)$$

$$\vec{v}_T(t_1) = \vec{v}_T(t) \quad \Rightarrow \quad \Delta \vec{v}_A = \Delta \vec{v}_R \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta \vec{v}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}_R}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}_A}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}_R}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{a}_A = \vec{a}_R \qquad \textbf{[10]}$$

Un punto materiale in moto ha uguale accelerazione vettoriale rispetto a due sistemi di riferimento in moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro, cioè il punto materiale ha la stessa accelerazione rispetto a tutti i sistemi inerziali.





Il sistema $O'x'y'z'$ trasla con velocità vettoriale costante $\vec{v}_o$ rispetto al sistema $Oxyz$. Le accelerazioni di un punto materiale nei due distinti sistemi di riferimento sono uguali

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 S ed S' in moto traslatorio 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 al sistema S' 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 sono la **massa** di un corpo, il tempo, l'accelerazione di un punto materiale quando consideriamo trasformazioni galileiane. Non sono grandezze invarianti né la posizione di un punto materiale né la sua velocità.

In modo analogo una legge fisica, cioè una relazione matematica tra alcune grandezze fisiche, si dice covariante per trasformazioni galileiane se assumono la stessa forma in due sistemi inerziali S ed S'. La legge fondamentale della dinamica è covariante per trasformazioni galileiane in quanto nel sistema S assume la forma $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ e nel sistema S' assume la stessa forma $\vec{F}' = m \cdot \vec{a}'$. Se non solo la legge conserva la stessa forma, ma

anche le grandezze $\vec{F}$, $\vec{F}'$, $\vec{a}$, $\vec{a}'$ assumono lo stesso valore in S ed in S', si dice che la legge considerata è **invariante per trasformazioni galileiane**. La legge fondamentale della dinamica è invariante per trasformazioni galileiane.

Invarianza delle leggi della dinamica: principio di relatività classica

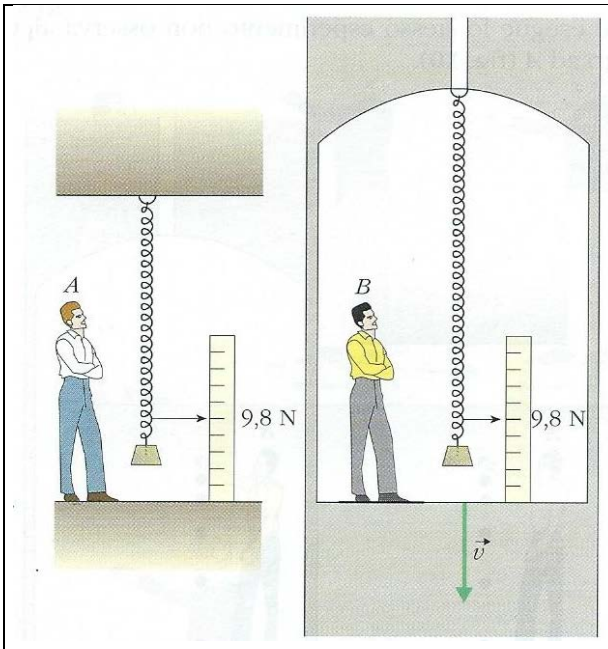
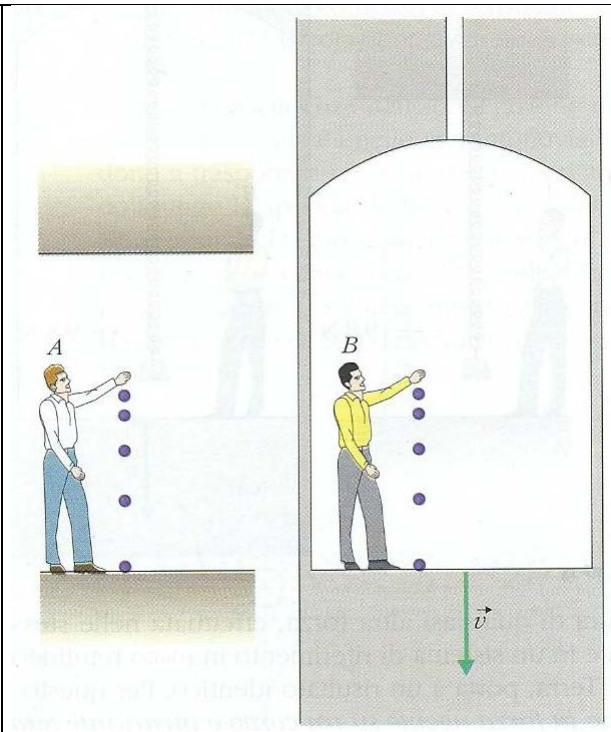
La legge fondamentale della dinamica $\vec{F} = m\vec{a}$ conserva la sua forma con gli stessi valori di $\vec{F}$ ed $\vec{a}$ in tutti i sistemi inerziali. Anche la terza legge della dinamica (**principio di azione e reazione**) è valido in tutti i sistemi inerziali in quanto la forza è un **invariante per trasformazioni galileiane**.

Concludiamo affermando che i **principi della dinamica** sono validi in tuti i **sistemi inerziali**, cioè i sistemi inerziali sono perfettamente equivalenti nei confronti delle leggi della dinamica. In termini diversi possiamo dire che i **principi della dinamica sono invarianti per trasformazioni galileiane**.

Ne scaturisce un'importante osservazione che va sotto il nome di **principio di relatività classica**:

<< **i fenomeni meccanici si svolgono nello stesso modo in tutti i sistemi inerziali**>>.

Per tale motivo un osservatore non sarà mai in grado di evidenziare il **moto traslatorio rettilineo uniforme** del proprio sistema inerziale unicamente osservando un certo fenomeno meccanico nel proprio sistema di riferimento.

	
L'osservatore A a terra e l'osservatore B in un ascensore in moto rettilineo uniforme, misurando il peso di uno stesso corpo a mezzo di un dinamometro, trovano valori uguali.	Un corpo, lasciato libero da fermo, cade verticalmente con accelerazione $\vec{g}$ rispetto ad entrambi gli osservatori A e B.

Galileo spiega il principio di relatività classica

Abbiamo detto che le **leggi fondamentali della meccanica** sono invarianti rispetto ad una trasformazione galileiana. Questo significa che tutti gli osservatori inerziali sono **fisicamente equivalenti** e quindi un qualsiasi fenomeno meccanico si svolge con le stesse leggi rispetto a tutti i sistemi di riferimento inerziali. Possiamo anche dire che se mi trovo in una cabina chiusa posso accorgermi se la cabina subisce delle accelerazioni, ma nessun esperimento meccanico mi permetterà di accorgermi se la cabina è animata da un moto puramente **traslatorio, rettilineo ed uniforme**. In altre parole il **principio di relatività classica** ci dice che un viaggiatore all'interno di un veicolo che descrive una retta con velocità vettoriale

costante, non ha alcun modo, se non guarda fuori dal finestrino, di accorgersi del moto del proprio veicolo. Un astronauta in una capsula spaziale che si muove nello spazio interplanetario di moto rettilineo uniforme, lontano da qualsiasi stella o pianeta, senza potere disporre di alcun riferimento per misurare la propria velocità, non è in grado di stabilire se è o non è animato da un moto di tale genere. Tutto questo può essere espresso dicendo che la velocità è una grandezza relativa, mentre l'accelerazione è una grandezza assoluta.

Vediamo come Galileo Galilei espone questi concetti nella sua opera Dialogo dei massimi sistemi, seconda giornata.

"Rinserratevi 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 di acqua e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche sechiello che a goccia a goccia vadia versando del- l'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 nuotando indifferentemente per tutti i versi, le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto, e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliarda mente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi come si dice, a piè giunti, eguali spazi passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che

mentre il vassello stà fermo non debbano succeder così, fate muovere la nave con quanta si voglia velocità; (purché il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina oppure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi sèorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso pop- pa, che se voi fuste situati per l'opposito; le gocciole cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor vo- li indifferentemente verso tutte le parti, né mai accadrà che si riduchino verso la parte che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso

si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugoletta trattenervisi, e indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte. E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che perciò dissi io che si estesse sotto coverta".

Ritraducendolo in termini meno efficaci ma più sintetici ed utili il principio di relatività classica può essere enunciato nella seguente maniera:

<<**Colui che sta in una cabina chiusa S', animata di moto traslatorio rettilineo uniforme rispetto ad un sistema di riferimento inerziale S, non ha alcun modo di accorgersi del proprio moto rispetto ad S mediante un qualsiasi esperimento di meccanica**>>

In maniera ancora più sintetica, il principio di relatività classica può così enunciato:

<<**le equazioni della meccanica sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo**>>

Le trasformazioni galileiane applicate alle grandezze cinematiche del moto nel caso generale

In un ser **S.R.I.** la legge fondamentale della dinamica si traduce nell'equazione

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \textbf{[11]}$$

Vediamo come si trasforma l'equazione [11] quando riferiamo il moto del corpo ad un sistema di riferimento non inerziale. Si possono presentare tre casi:

(1) S' si muove rispetto ad S di moto traslatorio. Risulta:

[12] $\vec{s} = \vec{s}_R + \vec{s}_T$ composizione degli spostamenti

[13] $\vec{v} = \vec{v}_R + \vec{v}_T$ composizione delle velocità

[14] $\vec{a} = \vec{a}_R + \vec{a}_T$ composizione delle accelerazioni

(2) S' si muove rispetto ad S di moto rotatorio, **con** $O' \equiv O$. **Risulta:**

[12] $\vec{s} = \vec{s}_R + \vec{s}_T$ composizione degli spostamenti

[13] $\vec{v} = \vec{v}_R + \vec{v}_T$ composizione delle velocità

[15] $\vec{a} = \vec{a}_R + \vec{a}_T + \vec{a}_C$ composizione delle accelerazioni $\vec{a}_R = \vec{a} - \vec{a}_T - \vec{a}_C$

- $\vec{v}_T = \vec{\omega} \wedge \vec{r}$ velocità di trascinamento
- $\vec{a}_T = \vec{\omega}(\vec{\omega} \wedge \vec{r})$ accelerazione di trascinamento e corrisponde ad una accelerazione centripeta
- $\vec{a}_C = 2\vec{\omega} \wedge \vec{v}_R$ accelerazione di Coriolis o accelerazione complementare [1]
- $\vec{\omega}$ è la velocità angolare di S' rispetto ad S. Quindi $\vec{\omega}$ rappresenta la velocità angolare istantanea della terna mobile rispetto alla terna fissa.

[1] L'**accelerazione di Coriolis** si annulla solo in tre casi: 1) quando il moto di trascinamento è traslatorio 2) quando il punto materiale P è in quiete rispetto alla terna mobile 3) quando $\vec{\omega}$ e $\vec{v}_R$ hanno la stessa direzione

- $\vec{r}$ è il vettore posizione rispetto al sistema mobile S' del punto materiale P, che coincide col vettore posizione di P rispetto ad S in quanto risulta **O′≡O**.

Secondo un osservatore solidale con la terna fissa S, l'accelerazione del punto materiale P viene attribuita all'azione di una forza secondo la legge di Newton $\vec{F} = m\vec{a}$

Essendo per ipotesi S un **S.R.I.** la forza $\vec{F}$ è dovuta all'azione di altri corpi su P, poiché, in mancanza di quest'ultimi, P si muoverebbe di moto rettilineo uniforme.

Dal punto di vista di un osservatore solidale con la terna mobile S' i fenomeni vengono descritti in modo differente. Tale osservatore attribuisce al corpo un'accelerazione $\vec{a}_R$ alla quale, se vuole che valga ancora la legge di Newton, deve fare corrispondere una forza $\vec{F}_R = m\vec{a}_R$. Per la [15] abbiamo: $\vec{F}_R = m\vec{a} - m\vec{a}_T - m\vec{a}_C$

Questo significa che $\vec{F}_R$ in generale è diversa da $\vec{F}$ e non è dovuta solo all'azione di altri corpi, ma anche agli effetti del moto relativo dei due **S.R.** che si manifestano con la presenza di due forze $\vec{F}_T = -m\vec{a}_T$ ed $\vec{F}_C = -m\vec{a}_C$ dette forze d'inerzia o forze apparenti o forze fittizie. Esse esistono solo per l'osservatore mobile per il quale la seconda legge di Newton si esprime nella forma:

$$\vec{F}_R = m\vec{a}_R = \vec{F} + \vec{F}_T + \vec{F}_C = m\vec{a} - m\vec{a}_T - m\vec{a}_C$$

$\vec{F}$ è una forza reale nel senso che è il risultato dell'interazione di corpi. Essa non muta quando si passa da un **S.R.I.** ad un altro S' in moto arbitrario; $\vec{F}$ è invariante rispetto ad un tale passaggio. Questo non si verifica per le forze d'inerzia, cioè le forze d'inerzia non sono invarianti rispetto a tale passaggio ed in ciò si distinguono dalle forze reali che sorgono come interazione tra corpi. Un'altra differenza consiste nel fatto che le forze d'inerzia non ubbidiscono al principio di azione e reazione. Se un corpo è sottoposto all'azione di una forza d'inerzia, non esiste una forza di reazione applicata ad un altro corpo.

- $\vec{F}_C = -m\vec{a}_C$ è una forza detta forza di Coriolis

- $\vec{F}_T = -m\vec{a}_T$ è la forza di inerzia di trascinamento e risulta costituita da tre termini:

(1) $-m\cdot\vec{a}_{O'}$ è la forza d'inerzia di traslazione dovuta al moto accelerato dell'origine O' del sistema mobile S'

(2) $-m\cdot\frac{d\vec{\omega}}{dt}\wedge\vec{r}$ è determinato dalla non uniformità della rotazione del sistema mobile; non ha una denominazione particolare

(3) $\vec{F}_{cf} = -m\vec{\omega}(\vec{\omega}\wedge\vec{r})$ è detta forza d'inerzia centrifuga o semplicemente forza centrifuga All'azione della forza centrifuga è sottoposto un passeggero di un autobus in moto che effettua una curva.

Osservazione N°1: L ' accelerazione di Coriolis si manifesta quando il punto materiale P è in moto rispetto al sistema mobile S' e questi ruota rispetto al sistema fisso.

Osservazione N°2: Per trattare un problema di meccanica abbiamo due possibilità:

(a) si sceglie come **S.R.** un **S.R.I.**. In questo caso si considerano solo **forze reali**, cioè forze che possiamo realmente associare a corpi ben definiti nelle vicinanze e che rientrano in una delle 4 classi di interazione fondamentali esistenti in natura

(b) si assume come **S.R.** un sistema non inerziale. Accanto alle forze reali si devono considerare le forze fittizie che nascono a causa dell'accelerazione posseduta dal sistema mobile.

Esempio Quando leghiamo un sasso all'estremità di un filo e lo mettiamo in rotazione, sentiamo che il filo tende a sfuggirci di mano. E' naturale interpretare il fatto dicendo che, per effetto della rotazione, il sasso è sottoposto ad una **forza centrifuga**. Questo modo di esprimersi è il risultato di un passaggio, più o meno consapevole, dal

S.R.I. (solidale con la terra) a quello ruotante (non inerziale) solidale col filo e col sasso. Secondo un osservatore inerziale la forza centripeta $F_c = m \cdot a_c = m \cdot \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$ è la forza che, attraverso il filo, dobbiamo comunicare al sasso per costringerlo a muoversi lungo la circonferenza di raggio r con quella velocità. Invece, secondo un osservatore non inerziale che ruota assieme al sistema **sasso + filo**, $F_c = m \cdot a_c = m \cdot \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$ è la forza uguale ed opposta alla forza centrifuga che è necessario applicare al sasso affinché questi rimanga in equilibrio statico.

Possiamo concludere affermando che **nello studio del moto di un corpo P relativo ad un riferimento non inerziale, in moto con legge di trascinamento nota rispetto ad un S.R.I., si possono applicare tutte le leggi della dinamica purché si considerino applicate al punto materiale P oltre al risultante $\vec{F} = m\vec{a}$ delle forze reali che prescindono dal moto relativo dei due S.R., anche la forza d'inerzia di trascinamento $\vec{F}_T = -m\vec{a}_T$ e quella di inerzia di Coriolis $\vec{F}_C = -m\vec{a}_C$.**

Studio del moto di un corpo in un sistema di riferimento non inerziale: forze fittizie

In precedenza abbiamo visto che **tutti i sistemi inerziali sono equivalenti nei confronti delle leggi della dinamica**. Abbiamo visto cosa succede al vettore posizione, al vettore velocità, al vettore accelerazione quando si passa da un sistema inerziale S [‡] ad un altro sistema S' in moto accelerato rispetto ad S.

- Un osservatore solidale con la terra sapendo di ruotare attorno al Sole di moto circolare uniforme afferma che su di esso agisce la forza centripeta

[‡] il sistema inerziale potrebbe essere un osservatore solidale con la terra, oppure un osservatore solidale col sole etc.

$F_c = m \cdot a_c = m \cdot \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$, dove **v** è la velocità lineare con cui la terra ruota attorno al Sole.

Appurato che esso è in equilibrio statico, deve ammettere che su di esso agisce una forza centrifuga uguale ed opposta a quella centripeta. Tale forza centrifuga non è una forza reale in quanto non nasce come interazione tra corpi. Essa è una forza fittizia in quanto l'osservatore solidale con la terra non costituisce un sistema inerziale. In questo caso la forza fittizia è una forza di trascinamento.

Conclusione

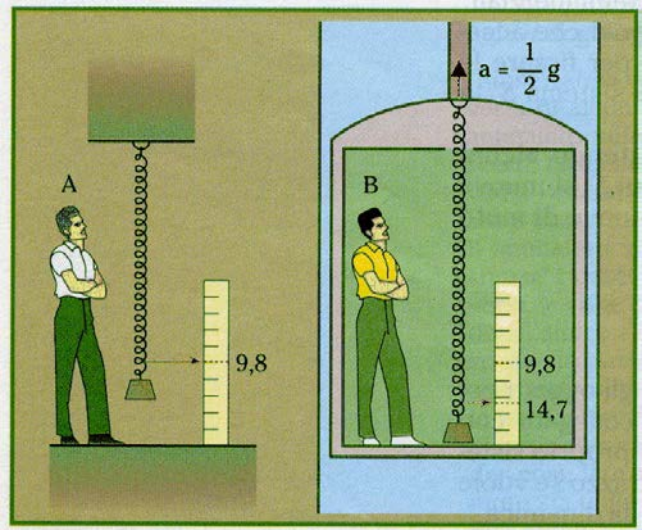
Un osservatore solidale con la Terra si vede in equilibrio statico [1] e giustifica questa situazione affermando che su di esso agiscono la forza centripeta (che è una forza reale) dovuta all'interazione col Sole e la forza centrifuga (che è una forza fittizia) dovuta al fatto che l'osservatore non è inerziale.

Un osservatore solidale col Sole vede le cose diversamente e fa il seguente ragionamento. La Terra ruota attorno al Sole muovendosi di moto circolare uniforme. Perché ciò sia possibile occorre che una forza centripeta agisca sulla Terra. Questa forza centripeta è fornita dall'interazione gravitazionale del Sole con la Terra. E' questa forza $\vec{F}$, ortogonale istante per istante alla velocità vettoriale della Terra, che impone alla Terra di muoversi lungo una circonferenza. Essendo poi $\vec{F} \perp \vec{v}$ non c'è forza tangenziale e quindi non c'è variazione nel modulo della velocità vettoriale $\vec{v}$. Il moto è circolare uniforme.

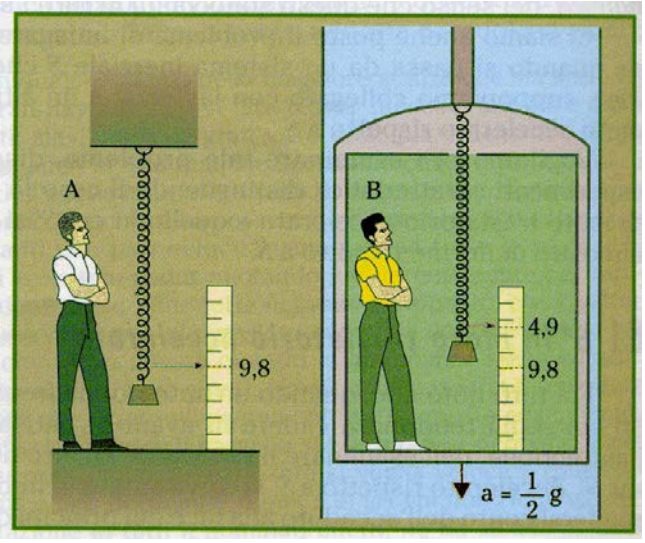
- Le leggi della dinamica sono valide sia in un **S.R.I.** che in uno non inerziale. Nel primo possono agire solo forze reali, nel secondo possono agire anche le forze fittizie (forze di trascinamento e forze di Coriolis). Un qualsiasi fenomeno fisico può essere studiato anche da un sistema non inerziale, però, dovendo includere anche le

[1] un punto materiale è in equilibrio statico quando è nullo il risultante di tutte le forze che agiscono su di esso ed è nulla la sua velocità vettoriale

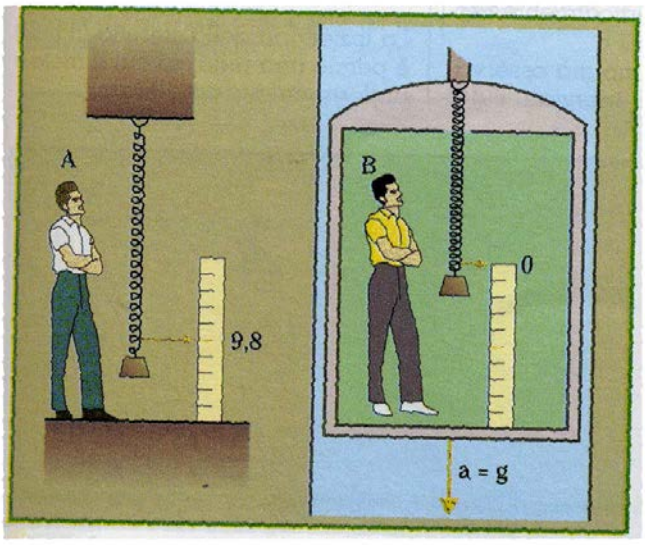
forze non inerziali, se vogliamo che le leggi della dinamica continuino a sussistere, le cose diventano più complesse. La scelta di un **S.R.I.** semplifica lo studio del fenomeno fisico in esame.



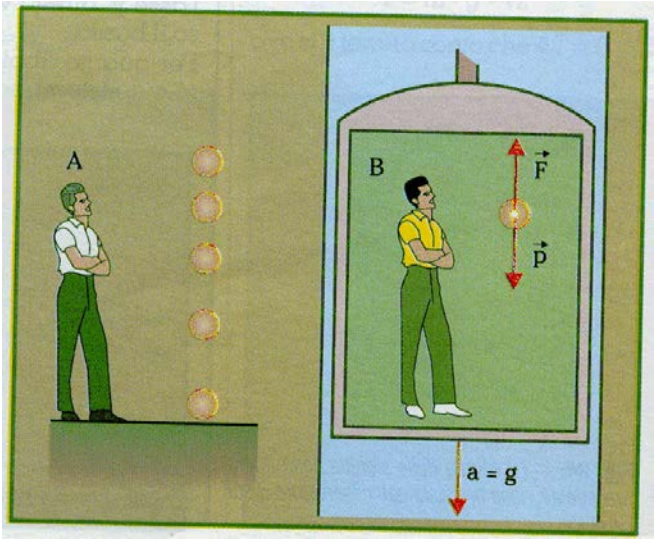
Gli osservatori A e B, collegati rispettivamente alla terra ed all'ascensore che sale con accelerazione $a = \frac{1}{2}g$, leggono sui propri dinamometri , ai quali è attaccato un corpo di massa $1kg$, rispettivamente i valori $9{,}8\,N$ e $14{,}7\,N$



L'osservatore n nell'ascensore che scende con accelerazione $a = \frac{1}{2}g$, trova come peso apparente di un corpo di massa $1kg$ il valore $4{,}9\,N$



L'osservatore B in un ascensore in caduta libera trova che il peso apparente di un corpo attaccato ad una molla è nullo .



Un grave , lasciato libero in un ascensore in caduta libera con accelerazione g , rimane sospeso in aria , rispetto all'osservatore B nell'ascensore . Lo stesso grave , rispetto all'osservatore A collegato con la Terra , cade di moto naturalmente accelerato . La forza risultante agente sul grave rispetto ad A è il peso , mentre rispetto a B è nulla .

Analizziamo adesso alcune situazioni concrete attraverso l'osservazione di alcuni eventi.

Le leggi di Newton valgono solo nei sistemi di riferimento inerziali. Quando l'accelerazione di un corpo è misurata rispetto a un sistema di riferimento che è esso stesso accelerato rispetto a un sistema di riferimento inerziale, la forza risultante sul corpo non è uguale al prodotto della massa del corpo per la sua accelerazione.

Però, anche in tale riferimento accelerato si può usare la legge di Newton $\sum \vec{F} = m\vec{a}$

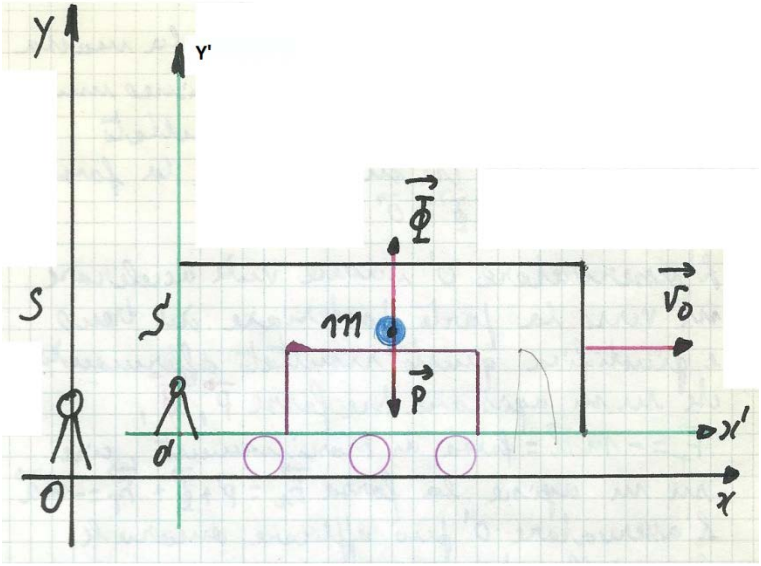
se si introducono forze fittizie che dipendono dall'accelerazione del sistema di riferimento. Queste forze non sono esercitate da alcun agente, ma sono soltanto enti fittizi introdotti per conservare la validità di $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ quando l'accelerazione $\vec{a}$ è misurata rispetto al riferimento non inerziale. Agli osservatori situati nel riferimento non inerziale, le forze fittizie sembrano tanto reali quanto le altre forze in virtù della salda credenza intuitiva nella seconda legge di Newton. La forza fittizia più familiare è la forza centrifuga che si incontra nei sistemi di riferimento rotanti.

S' si muove rispetto ad S di moto traslatorio.

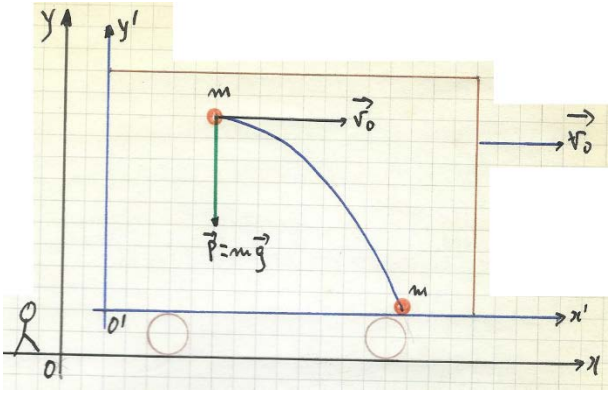
(a) Il moto traslatorio è rettilineo uniforme

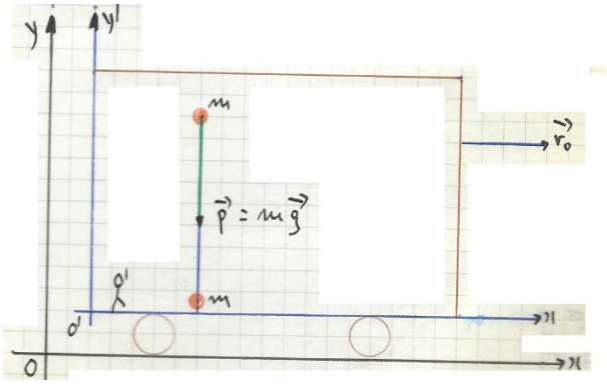
Tutti i punti di S' si muovono rispetto ad S di moto rettilineo uniforme, cioè tutti i punti di S' hanno la stessa velocità vettoriale che è costante nel tempo ed accelerazione vettoriale nulla. Consideriamo un vagone ferroviario che si muove in linea retta lungo un binario orizzontale. Sulla superficie (priva di attrito) di un tavolo saldato alla base del vagone collochiamo un corpo puntiforme di massa **m**. Riferiamo il moto della massa **m** ad un sistema S_{oxyz} solidale con la Terra (e che possiamo ritenere inerziale) e ad un sistema $S'_{o'x'y'z'}$ solidale col vagone. Il corpo **m** è inizialmente in quiete rispetto ad

$S'_{o'x'y'z'}$. Il vagone si muove rispetto al binario di moto traslatorio rettilineo uniforme con velocità vettoriale $\vec{v}_o$ costante. L'osservatore inerziale S_{oxyz} vede la massa **m** muoversi di moto rettilineo uniforme con velocità vettoriale $\vec{v}_o$ costante, mentre l'osservatore mobile $S'_{o'x'y'z'}$ vede la massa **m** ferma. Per S_{oxyz} le forze che agiscono su **m** sono la forza peso $\vec{P}=m\vec{g}$ e la reazione vincolare $\vec{\Phi}$ legate fra loro dalla relazione vettoriale $\vec{\mathbf{P}}+\vec{\mathbf{\Phi}}=\vec{\mathbf{o}}$ Per S_{oxyz} le tre leggi della dinamica sono valide in quanto **m**, essendo soggetta ad un sistema di forze a risultante nullo, si muove di moto rettilineo uniforme. Anche per $S'_{o'x'y'z'}$ le forze che agiscono su **m** sono $\vec{\mathbf{P}}$ e $\vec{\mathbf{\Phi}}$ con $\vec{\mathbf{P}}+\vec{\mathbf{\Phi}}=\vec{\mathbf{o}}$ e quindi per esso, che vede **m** ferma, sono valide le tre leggi della dinamica. S_{oxyz} e $S'_{o'x'y'z'}$ sono due sistemi inerziali.

L'osservatore O vede la massa m muoversi di moto rettilineo uniforme, mentre l'osservatore O' vede la massa m ferma. Per entrambi gli osservatori sono valide le leggi della dinamica.	

Supponiamo di togliere il tavolo. La massa **m**, non essendo più vincolata, si mette in movimento. Come descrivono la situazione gli osservatori S_{oxyz} e $S'_{o'x'y'z'}$?





L'osservatore $S'_{o'x'y'z'}$ vede la massa **m** muoversi lungo la verticale con accelerazione $\vec{g}$ costante. L'osservatore S_{oxyz} vede la massa **m** descrivere un arco di parabola con accelerazione $\vec{g}$ costante. Infatti per S_{oxyz} la massa **m** ha una velocità iniziale $\vec{v}_o$ ed è soggetta all'accelerazione di gravità $\vec{g}$.

(b) Il moto traslatorio è rettilineo uniformemente vario

Supponiamo che al vagone ferroviario venga comunicata una accelerazione costante $\vec{a}$ come indicato in figura. Tutti i punti di **S'** avranno la stessa accelerazione $\vec{a}$.

Consideriamo anzitutto un vagone ferroviario che si muove in linea retta lungo un binario orizzontale con accelerazione costante a rispetto al binario, che verrà supposto in un sistema di riferimento inerziale. Se si lascia cadere un oggetto nel vagone, l'oggetto non cade lungo la verticale ma cade verso la parte posteriore del vagone. Rispetto al vagone, ha un'accelerazione verticale $\vec{g}$ e un'accelerazione orizzontale $-\vec{a}$

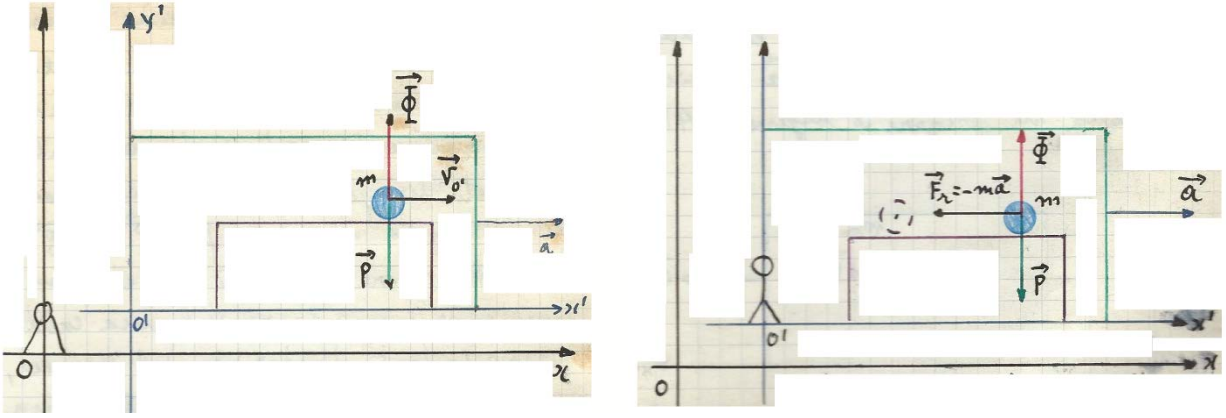
Un oggetto è lasciato cadere all'interno di un vagone ferroviario che è inizialmente in quiete ma ha un'accelerazione $\vec{a}$ verso destra.

(a) Un osservatore sul suolo, essendo in un sistema di riferimento inerziale, vede cadere la palla lungo la verticale con l'accelerazione di gravità $\vec{g}$. (b) Un osservatore nel vagone vede accelerare la palla verso il basso e verso sinistra rispetto al vagone. Poiché l'unica forza che agisce sulla palla è il suo peso verticalmente verso il basso, le leggi di Newton non valgono in un sistema di riferimento accelerato. Le leggi di Newton possono essere usate in queto riferimento se introduciamo una forza fittizia $\vec{F} = -m\vec{a}$ che va sommata alla forza peso $\vec{P} = m\vec{g}$, che giustifica il risultato visualizzato.

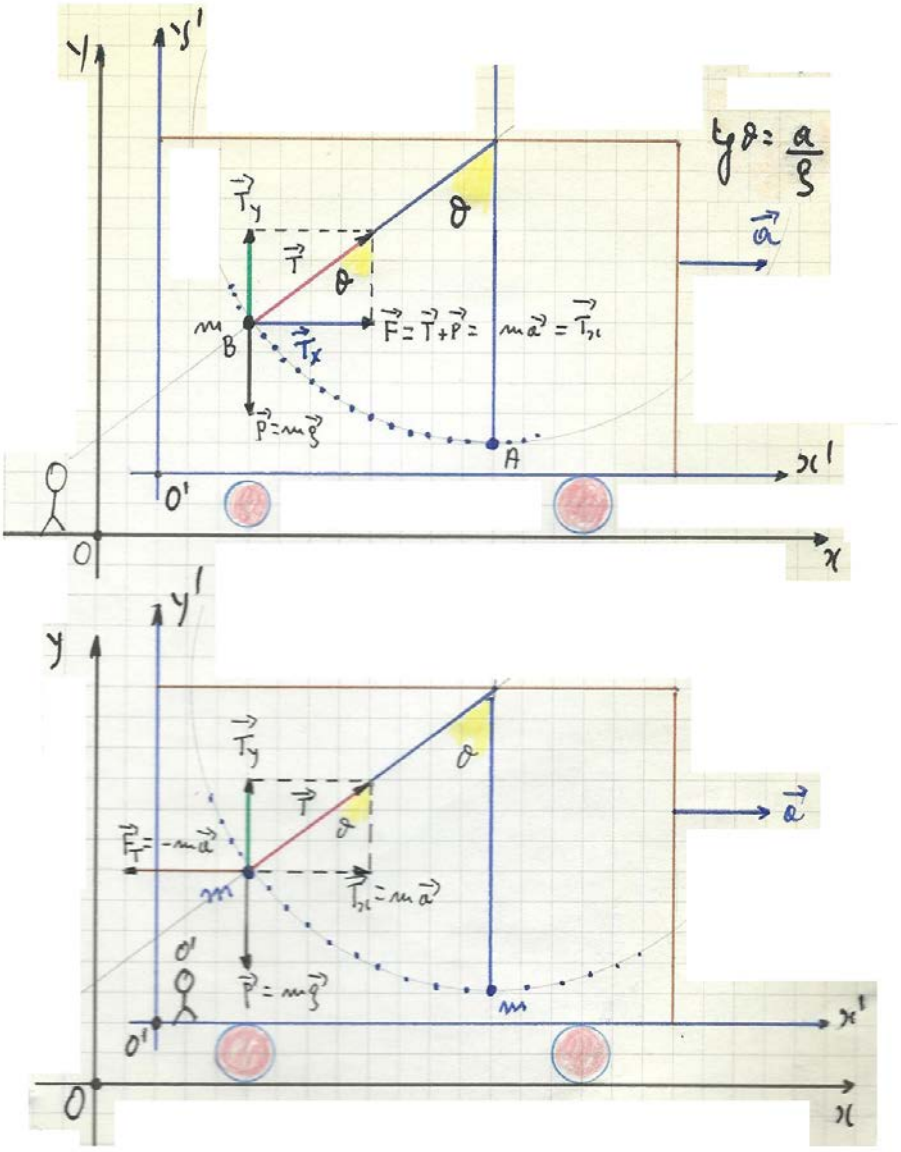
Se un corpo è collocato sopra un tavolo liscio possiamo fare le seguenti considerazioni. L'osservatore **S** vede ancora la massa **m** muoversi di moto rettilineo uniforme con velocità $\vec{v}_o$ e giustifica questo risultato affermando che su **m** agisce un sistema di forze a risultante nullo: $\vec{P}+\vec{\Phi}=\vec{0}$ L'osservatore **S′** invece vede accelerare **m** verso la parte posteriore del termo e giustifica questo risultato affermando che sul **m** agiscono tre forze $\vec{P}$, $\vec{\Phi}$ e la forza di trascinamento $\vec{F}_T=-m\vec{a}$, cioè su **m** agisce un sistema di forze il cui risultante ci viene fornito dalla relazione vettoriale:

$$\vec{F}_r=\vec{P}+\vec{\Phi}+\vec{F}_T=-m\vec{a}$$

L'osservatore accelerato **S′** può applicare ancora le leggi della dinamica se introduce la forza fittizia $\vec{F}_T=-m\vec{a}$ la quale non è spiegabile in termini di interazione tra altri corpi; essa è la conseguenza del fatto che l'osservatore **S′** non è inerziale in quanto possiede l'accelerazione $\vec{a}$.



Consideriamo adesso una lampada appesa mediante un filo al soffitto del vagone che, che rispetto al binario, ha accelerazione vettoriale $\vec{a}$ costante. La descrizione dell'accelerazione della lampada e delle forze che agiscono su di essa dal punto di vista dell'osservatore **O** e dell'osservatore **O′** è illustrata nella figura sottostante:



Secondo l'osservatore inerziale **O** la lampada accelera passando dalla posizione **A** alla posizione **B**. Il filo, che tiene legato la lampada al soffitto del vagone, deve imprimere alla lampada l'accelerazione $\vec{a}$. Quindi la tensione $\vec{T}$ del filo ed il peso $\vec{P}=m\vec{g}$ della lampada debbono essere tali da imprimere alla massa **m** la stessa accelerazione $\vec{a}$ del vagone. L'osservatore **O** scriverà l'equazione fondamentale della dinamica nel seguente modo. La lampada **m** è sottoposta all'azione di due forze reali: la forza peso $\vec{P}=m\vec{g}$ verticale verso il basso e la tensione $\vec{T}$ del filo. Il risultante $\vec{F}$ di queste due forze applicato alla massa **m** deve avere la stessa direzione e lo stesso verso di $\vec{a}$ perché per l'osservatore **O** la massa **m** è sottoposta a tale accelerazione.

Dovrà dunque essere: $\vec{P}+\vec{T}=\vec{F}$ cioè $\vec{P}+\vec{T}=m\vec{a}$

Se volessimo eseguire i calcoli abbiamo: $F=P\,tg\,\vartheta \Rightarrow ma=mg\,tg\,\vartheta$ $\mathbf{tg\,\vartheta=\frac{a}{g}}$

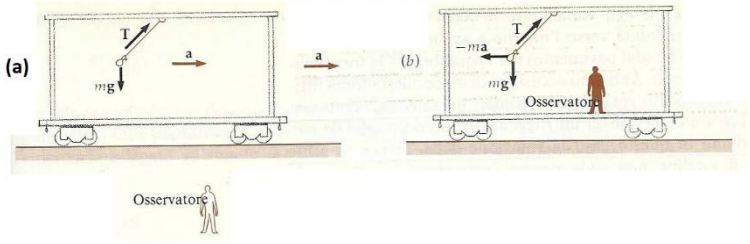
Come si vede ϑ è lo stesso qualunque sia la massa della lampadina.

$$T=\sqrt{F^2+P^2}=m\sqrt{a^2+g^2}$$

Concludendo possiamo affermare che per l'osservatore inerziale **O** il componente verticale ($\vec{T}_y$) della tensione $\vec{\mathbf{T}}$ equilibra il peso $\vec{\mathbf{P}}=\mathbf{m}\vec{\mathbf{g}}$, il componente orizzontale ($\vec{T}_x$) della tensione $\vec{\mathbf{T}}$ è la forza non equilibrata che imprime alla lampada l'accelerazione $\vec{\mathbf{a}}$ prevista ed osservata. All'osservatore **O′** la lampada di massa **m** appare ferma e quindi non è soggetta ad accelerazione. Infatti per l'osservatore **O′**, su **m** agiscono la forza peso $\vec{\mathbf{P}}=\mathbf{m}\vec{\mathbf{g}}$, la tensione del filo $\vec{\mathbf{T}}$ e la forza fittizia $\vec{F}_T=-m\vec{a}$. L'insieme dei tre vettori deve avere risultante nullo, cioè: $\vec{\mathbf{P}}+\vec{\mathbf{T}}+\vec{\mathbf{F}}_\mathbf{T}=\vec{\mathbf{o}}$

In questo caso $\vec{T}_y$ equilibra $\mathbf{m}\vec{\mathbf{g}}$, $\vec{T}_x$ equilibrala forza fittizia di trascinamento $-m\vec{a}$, cioè:

$$\vec{T}_y+m\vec{g}=\vec{T}_x+\vec{F}_T=\vec{o}$$



La lampada è appesa con un filo al soffitto di un vagone accelerato.

(a) Secondo l'osservatore inerziale, la componente verticale $\vec{T}_y$ della tensione $\vec{T}$ del filo equilibra il peso $\vec{P}=m\vec{g}$ e la componente orizzontale $\vec{T}_x$ è la forza che imprime l'accelerazione osservata.

(b) Secondo l'osservatore non inerziale situato nel vagone, la lampada è ferma e non è soggetta ad accelerazione in quanto la componente orizzontale della tensione del filo è equilibrata dalla forza fittizia $\vec{F}_T=-m\vec{a}$.

Piattaforma ruotante

Consideriamo una piattaforma che ruota attorno ad un asse fisso verticale con velocità angolare $\vec{\omega}$. Un filo flessibile, inestensibile e lungo **r** collega un corpo **A** di massa **m** con il punto **C** dell'asse di rotazione della piattaforma. Se vogliamo misurare che agisce sul corpo **A** possiamo inserire un dinamometro tra il filo ed il corpo **A**. Poiché il filo collega il corpo **A** col centro di rotazione della piattaforma, il corpo **A** è fermo rispetto alla piattaforma. Due osservatori **O** e **O′**, il primo solidale con la terra ed il secondo solidale con la piattaforma, osservano questo fenomeno e lo descrivono diversamente sia da un punto di vista cinematico (**O** dice che **A** si muove di moto circolare uniforme se ω è costante, **O′** dice che **A** è fermo) che da un punto di vista dinamico (**O** dice che su **A** agisce soltanto la forza centripeta $f_c = m a_c = m\omega^2 r$, **O′** dice che su **A** agiscono la forza centripeta $f_c = m a_c = m\omega^2 r$ e la forza centrifuga (la forza inerziale di trascinamento) $\vec{F}_T = -\vec{f}_c$. Secondo l'osservatore **O** il corpo **A** si muove lungo una circonferenza di centro **C** e raggio **r** con una velocità vettoriale $\vec{v}$ avente modulo $v = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ e con una accelerazione centripeta $\vec{a}_c$ avente modulo $a_c = \omega^2 r = \frac{v^2}{r}$ diretta verso il centro della circonferenza. Questa accelerazione centripeta $a_c = \omega^2 r = \frac{v^2}{r}$ è fornita dalla forza non equilibrata dovuta alla tensione del filo e misurata dal dinamometro. Infatti il vincolo (filo) che mantiene il corpo **A** in quiete rispetto alla piattaforma, esercita su questo corpo una forza centripeta $\vec{f}_c$ di modulo $f_c = m a_c = m\omega^2 r$ dove **m** è la massa del corpo ed **r** la distanza del corpo dall'asse di rotazione. Se $\vec{\omega}$ è costante la molla si allunga e rimane allungata dello stesso tratto. Se $\vec{\omega}$ varia nel tempo anche l'allungamento varia nel tempo. Secondo l'osservatore **O′**, solidale con la piattaforma, il corpo **A** è in quiete e giustifica questo risultato dicendo che: • su **m** agisce la forza reale dovuta alla tensione del filo $\vec{f}_c$ avente modulo $f_c = m a_c = m\omega^2 r$ • su **m** agisce la forza inerziale di trascinamento (che in questo caso prende il nome di forza centrifuga) $\vec{F}_T = -\vec{f}_c$ in quanto l'accelerazione di trascinamento del corpo **A** è $\vec{a}_c$

con $a_c=\omega^2 r=\frac{v^2}{r}$. Quindi per l'osservatore **O′** sul corpo **A** agisce la forza relativa $\vec{F}_R=\vec{f}_c+\vec{F}_T=\vec{f}_c-\vec{f}_c=\vec{0}$ che è una forza nulla e che giustifica la quiete di **A**. Quando il corpo **A** non risulta vincolato (cioè non legato al filo) allora esso è soggetto soltanto alla forza inerziale (forza centrifuga) per cui sarà accelerato radialmente verso l'esterno. E' proprio la forza centrifuga che noi percepiamo quando ci troviamo all'interno di un veicolo e questi affronta una curva. La forza centrifuga è indipendente dalla massa del corpo e cresce proporzionalmente alla distanza **r** dall'asse di rotazione $s.\ a_c=\omega^2 r=\frac{v^2}{r}$

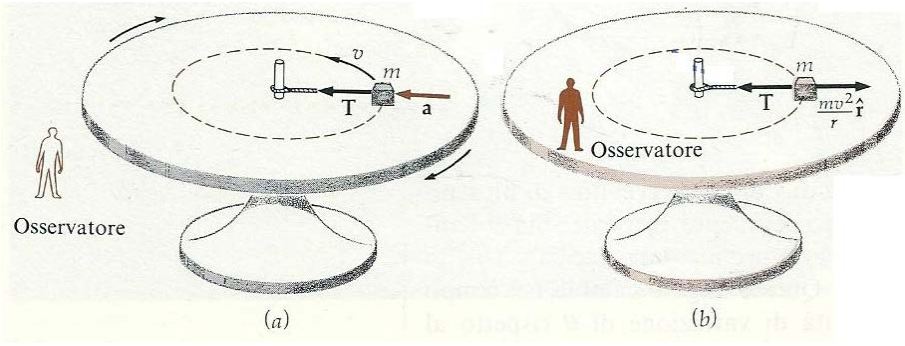


Figura [A]

Figura [A] Una massa **m** è legata mediante un filo flessibile ed inestensibile e lungo **r** al centro **C** di una piattaforma ruotante. (a) Un osservatore inerziale **O** vede la massa muoversi lungo un circonferenza di centro **C** e raggio **r**. **O** giustifica il tutto affermando che su **m** agisce la forza centripeta di modulo $f_c=ma_c=m\frac{v^2}{r}$ dovuta alla forza non equilibrata esercitata dalla tensione del filo che realizza il vincolo e che viene rilevata dal dinamometro. (b) un osservatore **O′** solidale con la piattaforma vede la massa **m** ferma. Giustifica il tutto affermando che su **m** agiscono due forze: • la forza centripeta $f_c=ma_c=m\omega^2 r$ che è una forza reale • la forza fittizia di trascinamento F_T (detta anche forza centrifuga) la stessa direzione e lo stesso modulo della forza

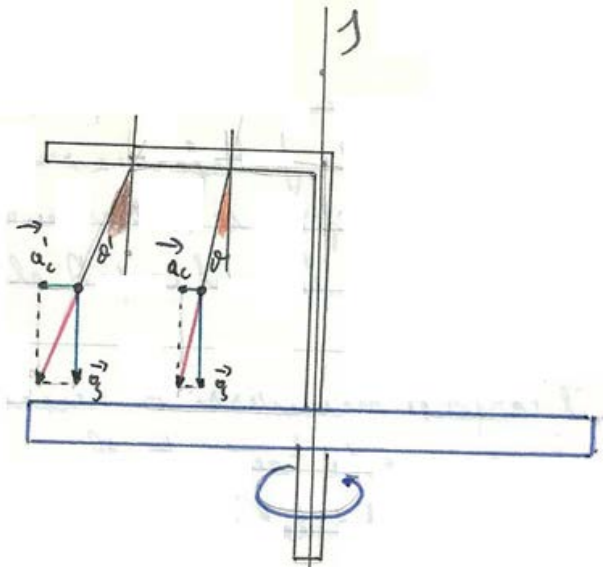
centripeta $f_c = m a_c = m\omega^2 r$ ma verso opposto $\vec{F}_T = -\vec{f}_c$. Su **m** agisce il seguente sistema di forze a risultante nullo. $\vec{F}_R = \vec{f}_c + \vec{F} = \vec{o}$.

Per i pendoli che ruotano come indicato in figura abbiamo: $\mathbf{tg}\,\vartheta = \frac{a_n}{g} = \frac{\omega^2 r}{g}$ da cui si vede che ϑ cresce man mano che ci si allontana dall'asse di rotazione **s**. Se sul disco che ruota poniamo un secchio con dell'acqua, in modo che l'asse del secchio coincida con quello del disco, si noterà che, via via che il movimento di rotazione si trasmette dal secchio all'acqua, la superficie di questa si incurva sempre di più, sollevandosi lungo le pareti e abbassandosi al centro. In ogni punto della superficie il risultante di tutte le forze agenti è perpendicolare alla superficie libera dell'acqua. Si verifica sperimentalmente e si dimostra teoricamente che la superficie libera dell'acqua posta nel secchio assume la forma di un paraboloide.

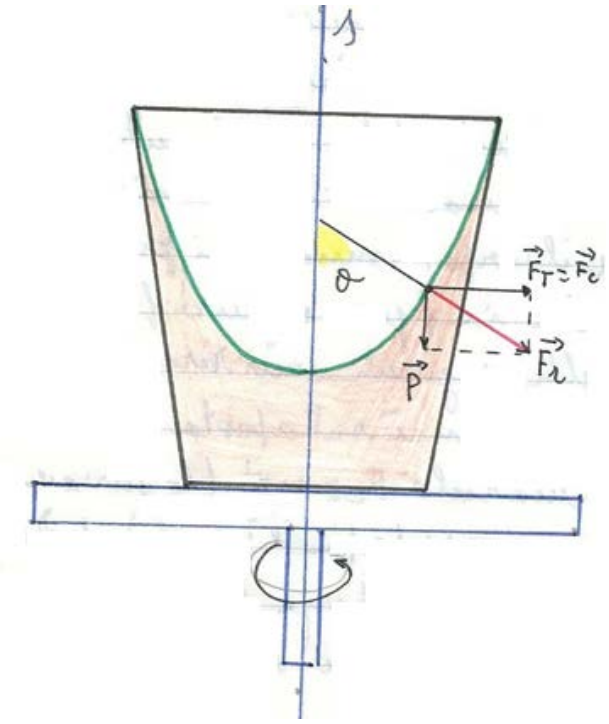
$\vec{a}_n$ = accelerazione centripeta

$\vec{a}_c = -\vec{a}_n$ = accelerazione centrifuga

Nel disco ruotante l'angolo ϑ aumenta man mano che ci allontaniamo dall'asse di rotazione **s**



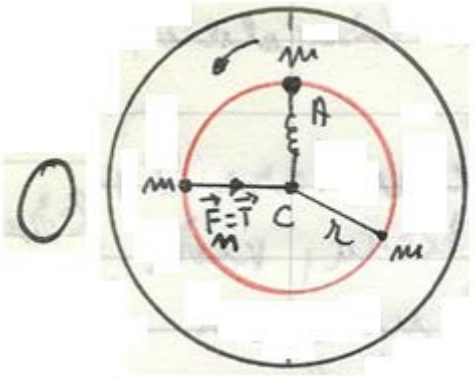
La superficie libera di un liquido posto in rotazione si incurva assumendo la forma di un paraboloide, La direzione della forza relativa $\vec{F}_R = \vec{P} + \vec{F}_T$, somma del peso e della forza centrifuga, è perpendicolare in ogni punto alla superficie libera del paraboloide. $\vec{F}_R$ tende a comprimere il liquido che reagisce con una forza $\vec{F}_e$ uguale e contraria alla forza $\vec{F}_R$.



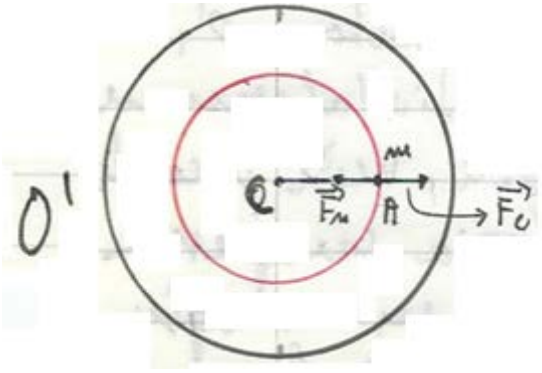
Domandiamoci adesso cosa succede se il corpo A, invece di essere in quiete rispetto alla piattaforma ruotante, è in movimento come si verifica se, all'istante t, l'osservatore O' taglia il filo che lega il corpo A al centro di rotazione della piattaforma. L'osservatore O vede il corpo A muoversi di moto rettilineo uniforme lungo la tangente alla circonferenza nel punto occupato dal corpo A al momento del taglio e giustifica questo risultato in base alle seguenti considerazioni. Nel momento del taglio il corpo A aveva, rispetto ad O, una velocità vettoriale $\vec{v}$ e quindi, adeso, non essendo sottoposto alla forza centripeta $\vec{F}_n$ dovuta al vincolo, si muove di moto rettilineo uniforme. L'osservatore O' vede il corpo A muoversi percorrendo la traiettoria indicata in figura e giustifica questo risultato in base alle seguenti considerazioni. Al momento del taglio m è sottoposta alla forza centrifuga $\vec{F}_c$ avente modulo $F_c = m\frac{v^2}{r}$ (la forza centripeta non c'è in quanto, col taglio del filo, non esiste più il vincolo) che da sola non giustifica la traiettoria descritta dal corpo. Il corpo A, essendo soggetto alla forza centrifuga, acquista una velocità rispetto all'osservatore O' il quale possiede la velocità angolare $\vec{\omega}$ rispetto all'osservatore O.

Questo significa che m possiede l'accelerazione di Coriolis $\vec{a}_{cor} = 2\vec{\omega} \wedge \vec{v}$ e su di essa agisce anche la forza di Coriolis. Quindi per l'osservatore O' su m agisce la forza relativa $\vec{F}_R = \vec{F}_c + \vec{F}_{cor}$ ed è questa forza relativa che determina la traiettoria indicata in figura.

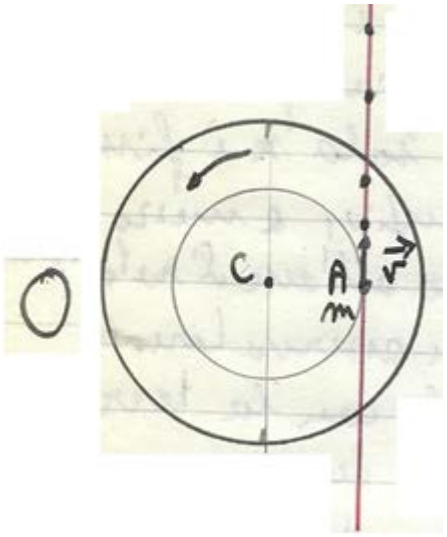
Un corpo A è in equilibrio su una piattaforma girevole solo se è fissato, per esempio, a mezzo di un filo all'asse di rotazione. Per un osservatore O, solidale con la Terra, il corpo A descrive una circonferenza sotto l'azione della forza centripeta $\vec{F}_n$ che il vincolo (filo) esercita sul corpo A.



Per un osservatore O', solidale con la piattaforma, il corpo A è fermo perché su di esso agiscono la forza centripeta $\vec{F}_n$ e la forza centrifuga $\vec{F}_c$. Tali forze sono uguali ed opposte, cioè sono a risultante nullo. La prima è una forza reale, la seconda è una forza fittizia.

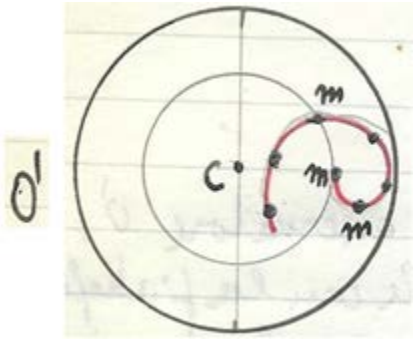


Il filo, che tiene il corpo A vincolato, si spezza. Un osservatore O, solidale con la Terra, vede il corpo A muoversi di moto rettilineo uniforme lungo la tangente alla circonferenza che stava percorrendo. Infatti per O su m non agisce nessuna forza.



N.B. Per l'osservatore O' la misura statica di una forza non coincide più con la misura dinamica della stessa forza.

Un osservatore O', solidale con la piattaforme ruotante, vede il corpo descrivere un traiettoria complessa e che giustifica col fatto che su m agiscono due forze fittizie: la forza di trascinamento, che in questo caso è una forza centrifuga, e la forza di Coriolis.



Satellite artificiale che ruota attorno alla Terra

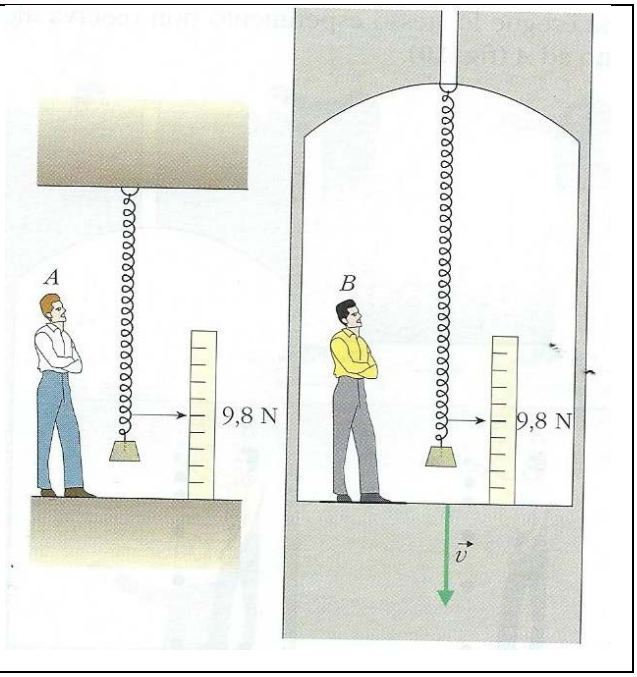
Si consideri un satellite vicino alla superficie terrestre ed osservato in un **S.R.I** solitale con la Terra. I sente spesso dire che il satellite non cade perché l'attrazione detta Terra è <<**equilibrata dalla forza centrifuga**>>. Questa osservazione non è corretta. Le forze fittizie come la forza centrifuga si manifestano soltanto nei sistemi di riferimento accelerati. Rispetto al sistema di riferimento terrestre il satellite cade verso la Terra con una accelerazione centripeta $\vec{a}_n$ di modulo $\frac{v^2}{r}$ prodotta dall'unica forza $\vec{F}_n$ non equilibrata che agisce su di esso, la forza di gravità.

Un osservatore situato nel satellite lo vede fermo e giustifica questa situazione dicendo che sul satellite agiscono due forze: la forza centripeta (reale) $\vec{F}_n$ e la forza centrifuga $\vec{F}_c = -\vec{F}_n$ (fittizia) dovuta al fatto che l'osservatore, solidale con il satellite, possiede una accelerazione. Il satellite percorre un'orbita circolare perché è stato collocato in un punto A dello spazio dove la sua velocità vettoriale $\vec{v}$ era perpendicolare alla forza gravitazionale. Questa forza, agendo ortogonalmente a $\vec{v}$, determina soltanto una variazione nella direzione di $\vec{v}$, cioè impone al satellite una traiettoria circolare. Se il satellite fosse posto nella posizione A con velocità (rispetto alla Terra) nulla cadrebbe sulla Terra dovendosi muovere di moto rettilineo vario.

Ascensore di Einstein

Consideriamo un corpo di massa **m** sospeso all'estremo libero di un dinamometro avente l'estremo fisso rigidamente collegato col soffitto interno della cabina di un ascensore. L'ascensore può salire e scendere verticalmente con velocità vettoriale $\vec{\mathbf{v}}$ costante o variabile. In generale la massa **m** determina un allungamento nella molla del dinamometro ed un sistema di forze a risultante $\vec{\mathbf{R}}$ non nullo equilibrato dalla forza elastica $\vec{\mathbf{F}}_e$ della molla. Per semplicità di calcolo possiamo supporre $m = 1kg$ ed il suo peso $P = 9{,}8\,N$. Vediamo come descrivono questo fenomeno un osservatore solidale con la Terra ed un osservatore con la cabina dell'ascensore.

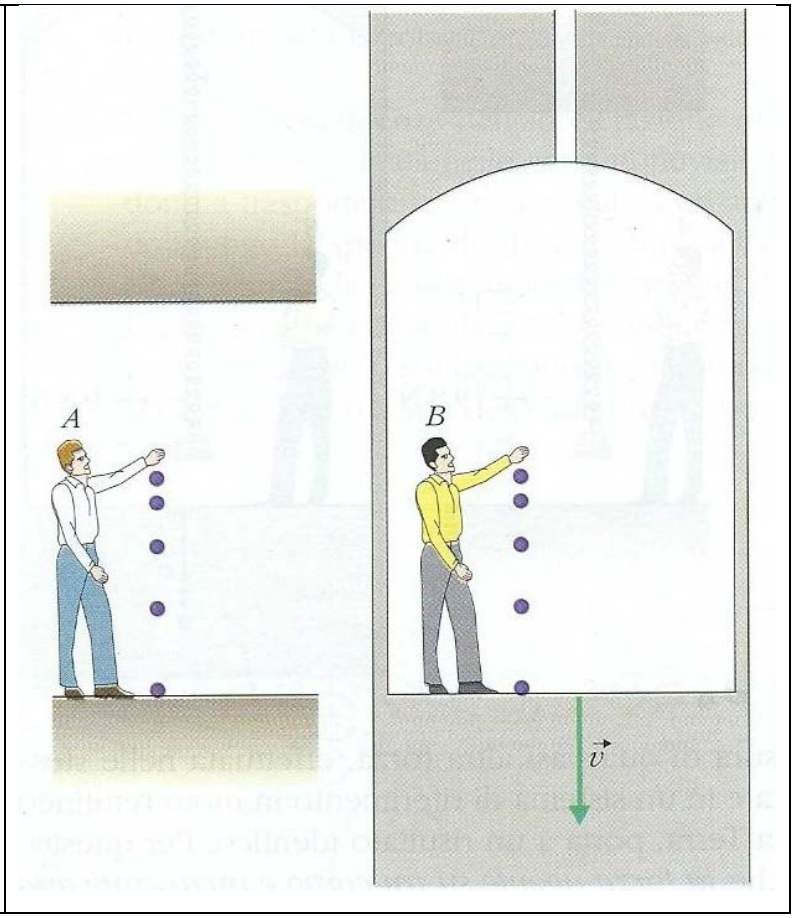
L'osservatore **A** a terra e l'osservatore **B** in un ascensore in moto rettilineo uniforme, misurando il peso di uno stesso corpo con un dinamometro, trovano lo stesso valore. I due osservatori, trovandosi in due sistemi di riferimento inerziali, non rilevano forze apparenti e quindi applicano allo stesso corpo la forza peso $\vec{P}=m\vec{g}$ equilibrata dalla forza elastica della molla.



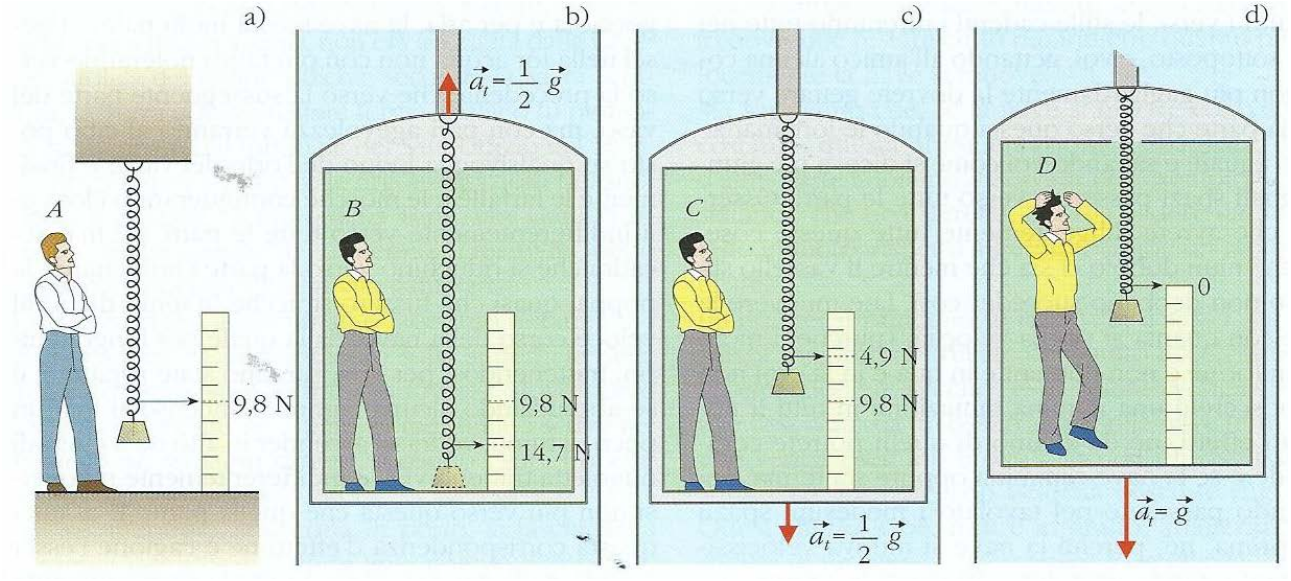
Consideriamo come esempio la caduta libera di un oggetto. Se l'osservatore **A** che si trova a terra lascia cadere un oggetto da fermo, osserva un moto uniformemente accelerato con accelerazione $\vec{g}$. L'osservatore **B** che esegue lo stesso non osserva alcuna differenza rispetto all'osservatore **A**.

Un corpo, lasciato libero da fermo, cade verticalmente con accelerazione $\vec{g}$.

Infatti i due sistemi sono entrambi inerziali e per entrambi la forza che agisce sul corpo è il suo peso $\vec{P}=m\vec{g}$.



Consideriamo l'osservatore **A**, a terra, che misura con un dinamometro il peso di un corpo ed un osservatore, dentro un ascensore che sale e scende con diversi valori dell'accelerazione, che misura allo stesso modo il peso del corpo.



L'osservatore **A**, fermo a terra, e gli osservatori **B**, **C** e **D**, ognuno al chiuso di un ascensore, misurano il peso di un corpo di massa $m=1kg$ con un dinamometro.

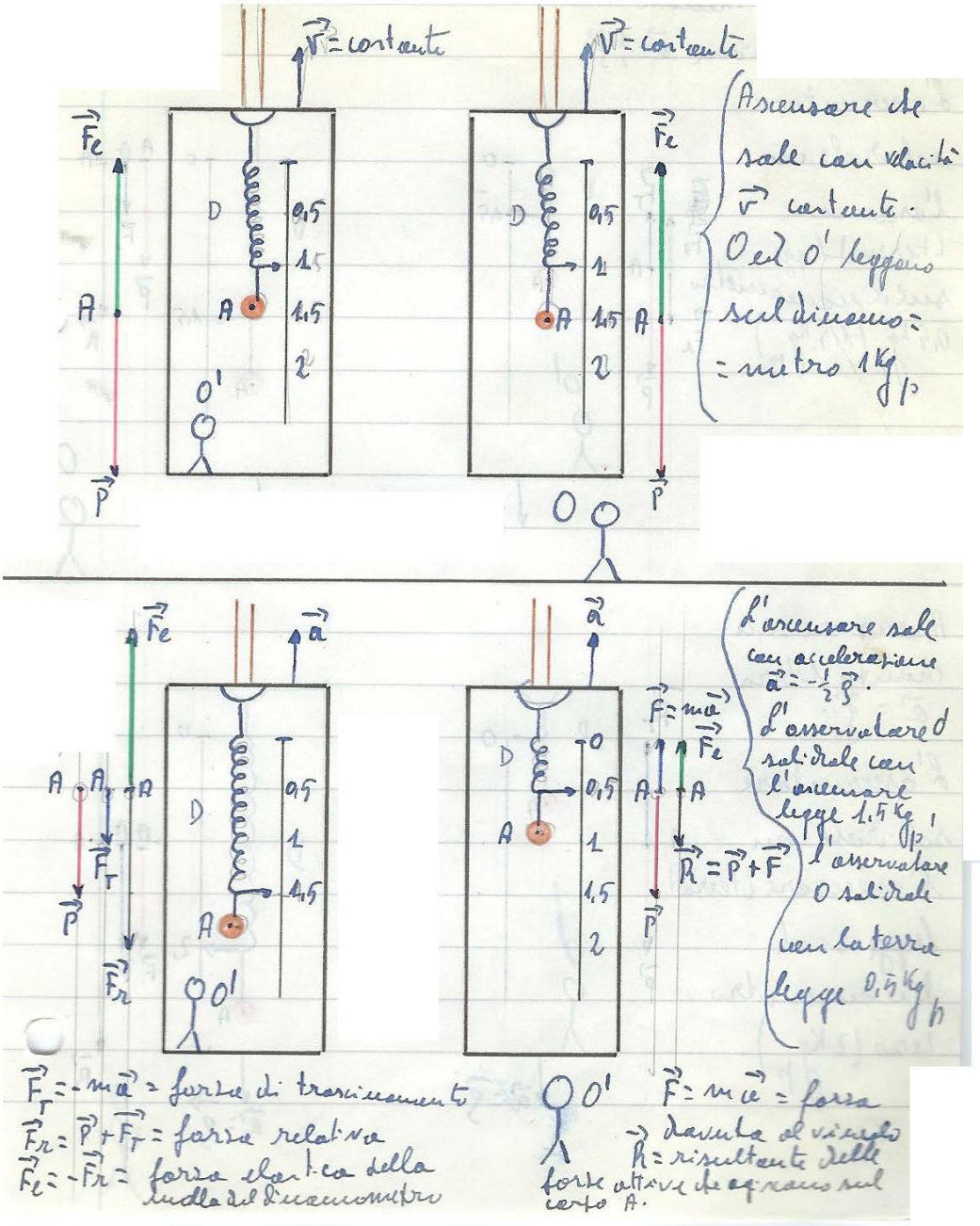
(a) L'osservatore **A** legge il valore $9{,}8\,N$ e lo giustifica dicendo che sulla massa $m=1kg$ agisce soltanto il suo peso.

(b) L'ascensore sale verticalmente verso l'alto con accelerazione $\vec{a}=-\frac{1}{2}\vec{g}$. L'osservatore **B** legge il valore $14{,}7\,N$ e lo giustifica dicendo che sulla massa $m=1kg$ agiscono il peso del corpo $\vec{P}=m\vec{g}$ verso il basso e la forza apparente $\vec{F}_T=-m\vec{a}=\frac{1}{2}\vec{g}$ verso il basso. Quindi sulla massa $m=1kg$ agisce una forza relativa $\vec{F}_R=\vec{P}+\vec{F}_T=m\vec{g}+\frac{1}{2}m\vec{g}=\frac{3}{2}m\vec{g}$ equilibrata dalla forza elastica della molla del dinamometro.

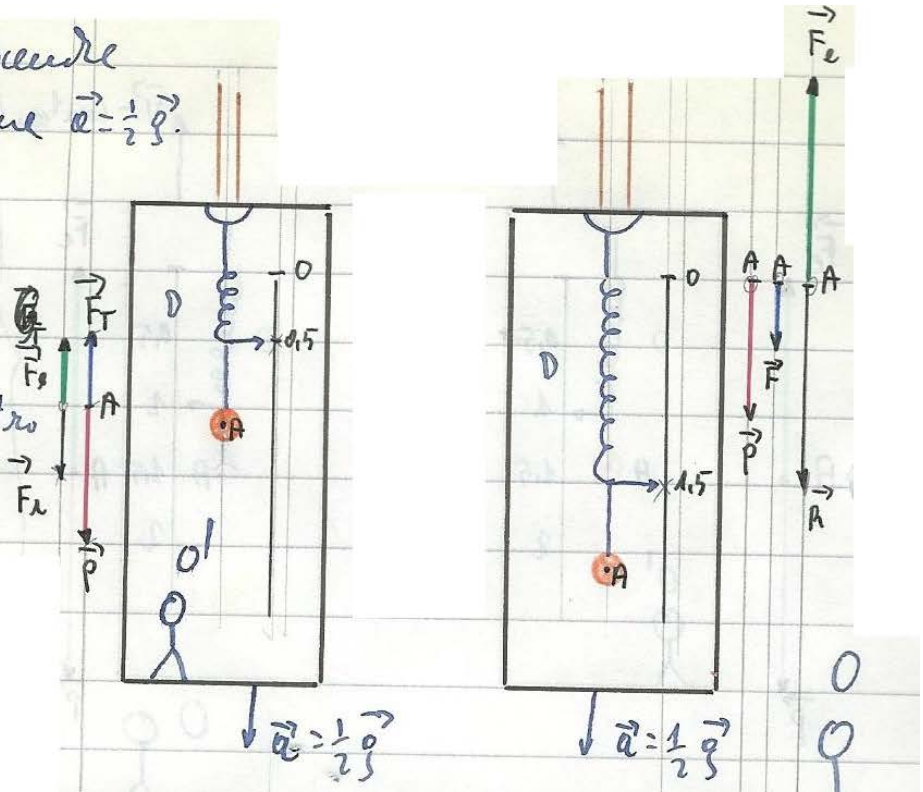
(c) L'ascensore scende verticalmente verso il basso con accelerazione $\vec{a}=\frac{1}{2}\vec{g}$. L'osservatore **C** legge il valore $4{,}9\,N$ e lo giustifica dicendo che sulla massa $m=1kg$ agiscono il peso del corpo $\vec{P}=m\vec{g}$ verso il basso e la forza apparente $\vec{F}_T=-m\vec{a}=-\frac{1}{2}\vec{g}$ verso il basso. Quindi sulla massa $m=1kg$ agisce una forza relativa $\vec{F}_R=\vec{P}+\vec{F}_T=m\vec{g}-\frac{1}{2}m\vec{g}=\frac{1}{2}m\vec{g}$ equilibrata dalla forza elastica della molla del dinamometro.

(d) L'ascensore cade verticalmente verso il basso con accelerazione $\vec{a}=\vec{g}$ (ascensore in caduta libera). L'osservatore **D** legge il valore zero e giustifica questo risultato dicendo che sulla massa $m=1kg$ agiscono il peso del corpo $\vec{P}=m\vec{g}$ verso il basso e la forza apparente $\vec{F}_T=-m\vec{a}=-m\vec{g}$ verso il basso. Quindi sulla massa $m=1kg$ agisce una forza relativa $\vec{F}_R=\vec{P}+\vec{F}_T=\vec{g}-\vec{g}=\vec{0}$ equilibrata dalla forza elastica della molla del dinamometro. Se durante la caduta libera dell'ascensore la massa $m=1kg$ si sgancia dal dinamometro l'osservatore **D** dice che la massa è ferma in quanto soggetta ad un sistema di forze a risultante nullo.

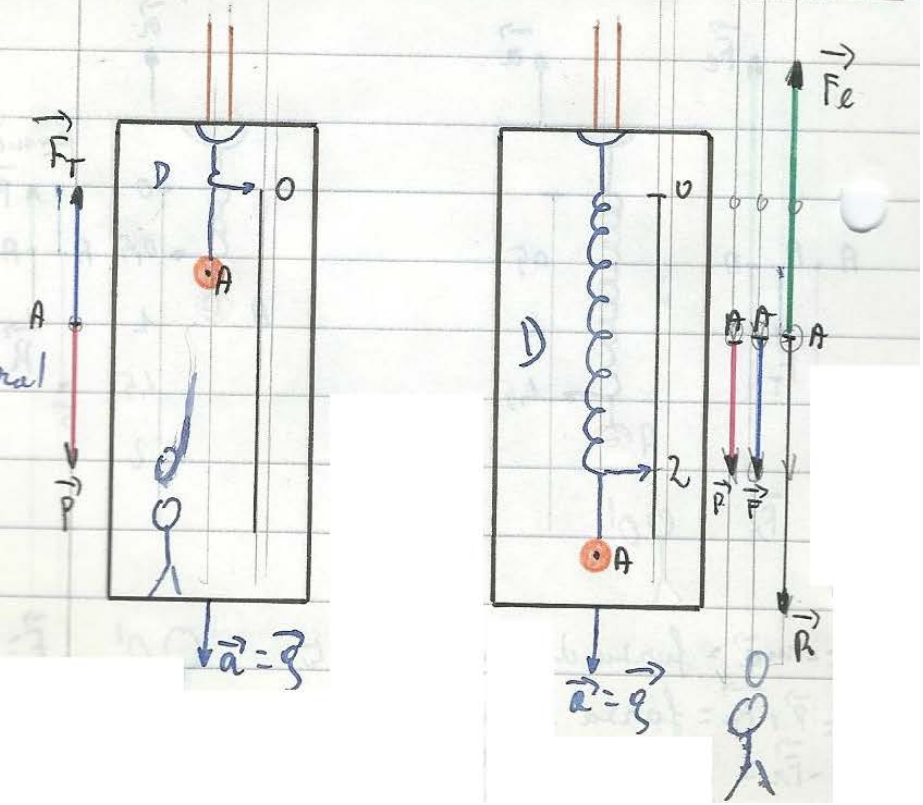
Spesso la forza relativa $\vec{F}_R$ somma del peso del corpo e di tutte le forze inerziali che agiscono su di esso è detta peso apparente.

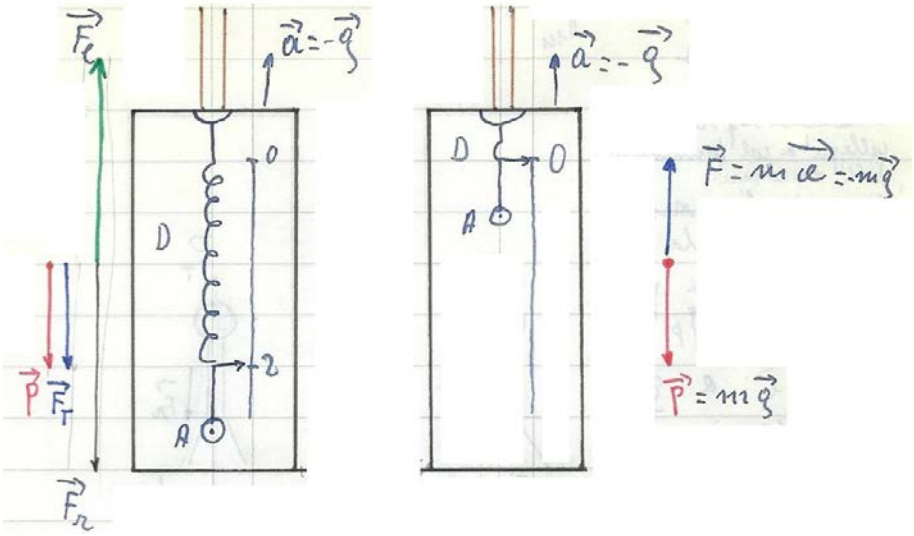


Ascensore che scende con accelerazione $\vec{a} = \frac{1}{2}\vec{g}$. L'osservatore solidale con l'ascensore (terra) legge sul dinamometro $0{,}5\ Kg_p$ ($1{,}5\ Kg_p$)



Ascensore in caduta libera $\vec{a} = \vec{g}$. L'osservatore solidale con l'ascensore (terra) legge sul dinamometro zero ($2\ Kg_p$).





I limiti della relatività galileiana

- Finora abbiamo esaminato le leggi della meccanica ed abbiamo evidenziato la loro invarianza rispetto alle trasformazioni galileiane. Questa invarianza è l'aspetto analitico del principio di relatività galileiana, in base al quale nessuna esperienza relativa a fenomeni meccanici può mettere in evidenza quale dei due sistemi di riferimento S ed S', in moto relativo traslatorio rettilineo uniforme con velocità vettoriale costante $\vec{v}$, è fermo e quale è in moto. In altri termini, dal punto di vista dei fenomeni meccanici, **tutti i sistemi inerziali sono equivalenti**, cioè **non esiste un sistema di riferimento privilegiato**.
- Esaminiamo ora la situazione nei riguardi del fenomeni elettromagnetici. Poiché i fenomeni elettromagnetici sono regolati dalle equazioni di Maxwell, qual è il comportamento di queste equazioni per effetto di una trasformazione galileiana? Sono esse invarianti come le leggi della dinamica? In altri termini, esiste un principio di relatività anche per i fenomeni elettromagnetici?

Questi furono i problemi che assillarono i fisici verso la fine del secolo scorso e che evidenziarono le difficoltà in cui si dibatteva la fisica classica per interpretare i fatti sperimentali che si andavano accumulando. Analizziamo le difficoltà della fisica prerelativistica. Dalle equazioni di Maxwell segue che in assenza di materia le onde elettromagnetiche si propagano con velocità $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

Rispetto a quale sistema deve intendersi misurata questa velocità? E' chiaro che, ammessa l'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato S rispetto al quale la velocità della luce è **c**, ritenute valide le trasformazioni di Galileo, segue che la velocità di propagazione della luce per un sistema S' in moto rispetto ad S ha un valore diverso da **c**. Infatti, se S' è in moto rispetto ad S con velocità v, la luce nel sistema S' ha una velocità il cui valore è compreso tra **c-v** e **c+v**. Poiché una delle conseguenze delle equazioni di Maxwell è che le onde elettromagnetiche si propagano in tutte le direzioni con velocità **c**, si arriva necessariamente al risultato che le equazioni di Maxwell sono differenti in due diversi riferimenti inerziali: **non sono invarianti per trasformazioni di Galileo**. ♦♥♠

Di conseguenza, eseguendo un esperimento di natura elettromagnetica, per esempio lanciando un segnale luminoso in tutte le direzioni e misurando i tempi di arrivo su una superficie sferica che circonda il punto di partenza, dovrebbe essere possibile definire sperimentalmente il proprio stato di moto inerziale, senza averne nessuna conoscenza a priori.

Galilei e Newton ritenevano che non si potesse dire, senza osservare l'esterno, a che velocità si stesse andando, se il moto era traslatorio rettilineo uniforme. Con lo sviluppo dell'elettrodinamica di Maxwell, insieme al concetto di etere, per la prima volta la scienza disponeva di leggi fisiche che suggerivano che si potesse misurare la propria velocità senza osservazioni esterne, cioè che si potesse rivelare il moto assoluto.

♦♥♠ In particolare , si riteneva che le equazioni di Maxwell avessero validità in un sistema di riferimento in quiete rispetto all'etere, ipotetico mezzo di propagazione per le onde elettromagnetiche

Il concetto di etere porterebbe alla conseguenza che con mezzi ottici si dovrebbe potere distinguere tra uno stato di moto uniforme e quello di quiete benché ciò non sia possibile con esperienze di meccanica. Una quantità di esperimenti basati su questo concetto generale furono eseguiti per determinare la velocità della Terra rispetto all'etere. Tutti questi tentativi fallirono, cioè diedero come risultato una velocità nulla. Risultava evidente una contraddizione intrinseca nella fisica, non eliminabile modificando, come si tentò di fare, le equazioni di Maxwell appena formulate, in quanto le nuove previsioni non trovavano questa volta alcuna conferma sperimentale. Accettate dunque in tutta la loro validità le equazioni di Maxwell, divenne chiaro, gradualmente, che l'errore era più sottile e che andava cercato altrove.

- E' a questo punto che Einstein, all'inizio del novecento, propone una nuova teoria della relatività: la **teoria della relatività ristretta**.

La **teoria della relatività ristretta** ha come postulati due principi che traggono la loro origine dai dati sperimentali raccolti alla fine del secolo scorso:

(1) Principio della relatività ristretta

Le leggi che governano tutti i fenomeni fisici debbono avere la stessa forma rispetto a tutti gli osservatori inerziali [ψ Φ]

(2) Principio della costanza della velocità della luce

La velocità della luce è sempre la stessa in tutti i riferimenti inerziali, indipendentemente dal moto della sorgente o dell'osservatore o, più sinteticamente, **la velocità c della luce è invariante rispetto al passaggio da un sistema di riferimento inerziale ad un altro.**

[ψ Φ] Due sistemi (osservatori) sono **inerziali** se ciascuno di essi si muove rispetto all'altro di moto traslatorio rettilineo uniforme

Questi due principi comportarono nuove equazioni per il passaggio da un sistema inerziale ad un altro sistema di riferimento inerziale. In particolare, ne segue che non solo non esiste uno spazio assoluto**,** ma neppure un tempo assoluto**.** Tali equazioni, dette trasformazioni di Lorentz, non presentano tutte quelle contraddizioni che abbiamo rilevato per le precedenti trasformazioni galileiane.

Alla ricerca di un corpo dell'Universo da assumere come S.R.I

In precedenza abbiamo detto che le leggi della meccanica classica sono rigorosamente valide in un **S.R.I. .** Avevamo detto anche che un **S.R.I** é un sistema nel quale sono valide le leggi della meccanica classica. Tutto questo sembra un circolo vizioso. In realtà lo é, in quanto il **S.R.I.** é solo una definizione, senza alcun riscontro nella realtà. Infatti la meccanica classica postula l'esistenza di un **S.R.** nel quale tutti i corpi liberi (cioé non soggetti a forze) hanno un moto rettilineo uniforme. Questo sistema prende il nome di sistema di riferimento inerziale **(S.R.I).** La legge d'inerzia si riduce all'affermazione dell'esistenza di almeno un **S.R.I** Solo con un procedimento sperimentale potremo decidere quali sistemi sono inerziali e quali non lo sono. Nessun procedimento sperimentale può stabilire, come vedremo in seguito, se un corpo dell'universo é, oppure nonè, un **S.R.I** Un **S.R.I** può essere solo pensato in astratto; esso esisterebbe se fosse possibile individuare dei punti fissi nell'universo. Siccome non ha Senso parlare di punti fissi non é possibile individuare concretamente un **S.R.** rigorosamente ed assolutamente inerziale. Nella pratica ci accontenteremo di individuare **S.R.** abbastanza inerziali. LA teoria della relatività ristretta di Einstein fornisce una nuova risposta al **S.R.I** introdotto nella meccanica classica. Ma lo stesso Einstein incontra delle difficoltà quando affronta il problema dei **S.R.I.** i quali, oltre ad essere realizzati solo approssimativamente mancano di una definizione rigorosa.

Infatti é possibile stabilire se un S.R. é "abbastanza inerziale" ma non si sa se esiste un sistema "assolutamente inerziale " Gli argomenti che mostrano le difficoltà connesse con la definizione di inerzialità di un **S.R.** sono riassunti nella seguente intervista, che lo stesso Einstein immagina di rivolgere ad un fisico classico. Domanda: Che cosa é un **S.R.I.**? Risposta: E' un **S.R.** nel quale valgono le leggi della dinamica. In tale sistema, un corpo sul quale non agisce alcuna forza esterna si muove di moto rettilineo uniforme. Questa proprietà ci permette di distinguere un **S.R.I** da qualunque altro sistema. Domanda: Ma che cosa deve intendersi allorché dite che nessuna forza agisce su un corpo? Risposta: Deve intendersi semplicemente che il corpo, allorché si trova in un **S.R.I** , si muove di moto rettilineo uniforme. Per tentare di superare questa tautologia Einstein chiede: Domanda: Un S.R. rigidamente collegato con la terra é forse inerziale? Risposta: No, perché le leggi della dinamica non sono rigorosamente valide sulla Terra, a causa della sua rotazione. Per molti problemi un S.R. collegato al Sole può essere considerato inerziale; ma, tenuto conto che il Sole é animato di un moto di rotazione intorno al centro della galassia, é evidente che neanche il sistema collegato al Sole é inerziale.

Domanda: Ma che cosa é, in concreto, il vostro **S.R.I** e quale stato dì moto gli va attribuito? Risposta: E' semplicemente una finzione utile, ma non ho nessuna idea di come possa realizzarsi. Se col mio S.R. potessi allontanarmi abbastanza da tutti i corpi materìali, e liberarmi così da tutte le influenze esterne, allora soltanto il mio

S.R. sarebbe veramente inerziale. Domanda: Ma cosa intendete per un sistema libero da tutte le influenze esterne? Risposta: Precisamente un **S.R.I** Lo stesso Newton si era reso conto di queste difficoltà e per superarle aveva sentito l'esigenza di postulare l'esistenza dello spazio assoluto. Secondo Newton il moto assoluto avviene rispetto allo spazio assoluto. In altre parole Newton afferma che l'accelerazione, a differenza della velocità, é sempre assoluta. Il limite della concezione newtoniana di moto é il seguente: "**si può parlare di moto soltanto rispetto alla materia e non, come fa Newton, rispetto allo spazio vuoto, cioé allo spazio matematico euclideo.**" Riassumendo possiamo affermare quanto segue: 1°) sono stati inventati degli astratti S.R. nei quali sono valide le leggi della meccanica classica, e sono stati chiamati sistemi di riferimento inerziali. 2°) ci si é resi conto che, se nell'universo vi fossero dei S.R.I., dovrebbero esservi anche dei corpi in quiete assoluta

3°) corpi con tali caratteristiche non esistono perché gli stati di quiete sono riconoscibili soltanto rispetto ad altri corpi e non in assoluto, cioè rispetto allo spazio matematico di Newton. Vediamo adesso se è possibile individuare nello spazio un corpo da assumere come S.R. con un sufficiente grado di inerzialità. " Un S.R. solidale con la superficie della Terra rappresenta un buon **S.R.I** ? Per molti scopi la Terra può essere considerata, con approssimazione soddisfacente, un **S.R.I** . Però un S.R. solidale con la superficie terrestre (detto riferimento galileiano) possiede una piccola accelerazione (dovuta alla rotazione della Terra attorno al proprio asse) che non sempre è possibile trascurare. Un punto fisso sulla superficie della Terra, posto all'Equatore, deve subire un'accelerazione centripeta , diretta verso l'asse di rotazione, data da:

$$\mathbf{a = \frac{v^2}{R_T} = \omega^2 R_T = \frac{4\pi^2 R_T}{T}} \qquad \text{con:}$$

$$\omega = 0,73 \cdot 10^{-4} \frac{rad}{s} \qquad R_T = 6,4 \cdot 10^6 \, m \qquad a = 3,4 \cdot 10^{-2} \frac{m}{s^2} = 3,4 \frac{cm}{s^2}$$

L'accelerazione che compete alla Terra attorno al Sole il suo moto di rivoluzione è di un ordine di grandezza inferiore a quella dovuta alla rotazione della Terra su se stessa:

$$a=\omega^2 R=\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2\cdot R=6\cdot 10^{-3}\frac{m}{s^2}=0,6\frac{cm}{s^2} \qquad T=1anno=3\cdot 10^7\ s \qquad R=1,5\cdot 10^{13}\ cm$$

Un S.R. con origine nel baricentro della Terra non risente della rotazione della Terra attorno al proprio asse, ma risente del solo moto di rivoluzione attorno al Sole.

E' perciò conveniente riferirsi ad esso nel caso di moti extraterrestri,di non troppa lunga durata rispetto all'anno solare (qualche giorno) fino a quando cioé si può considerare il centro della terra in moto rettilineo ed uniforme lungo la tangente dell'orbita terrestre.
Quindi un S.R. galileiano rispetto ad un numero di fenomeni molto elevato si comporta praticamente come un S.R.I.
Per questo motivo,per stabilire le leggi fondamentali della meccanica,si può partire da uno studio del moto dei corpi rispetto alla terra,e ignorando la sua rotazione, considerarla un S.R. approssimativamente inerziale.
Potremmo scegliere come S.R.I. il Sole . L'accelerazione del Sole rispetto al centro della nostra galassia non é conosciuta sperimentalmente,ma studi sullo spostamento delle righe spettrali per effetto Doppler fanno pensare che la velocità lineare del Sole,rispetto al centro della galassia,sia circa $v_S = 3.10^7 cm/s$.
Se il Sole si muove lungo un'orbita circolare con centro coincidente col centro della galassia,la sua accelerazione rispetto al centro galattico sarebbe:

$$a = \omega^2 R = \frac{v_S^2}{R} \cong 3.10^{-8} cm/s^2$$

cioé molto piccola.
Poiché l'accelerazione orbitale di questo moto é molto più piccola dell'accelerazione orbitale terrestre,il consideraRE il Sole come S.R.I. costituisce un'approssi= =mazione migliore della precedente.
Se poi scegliamo un S.R. con l'origine nel baricentro del Sole (meglio nel centro di massa del sistema solare) e gli assi coincidenti con tre rette che congiungono questo centro

con tre stelle estremamente lontane e che non si trovino su un medesimo piano,otteniamo un S.R. ancora più inerziale. Un S.R. di questo tipo é detto S.R. eliocentrico o S.R. copernicano . Il S.R. copernicano é un sistema inerziale per quanto riguarda i moti su scala del nostro sistema planetario. Se le tre stelle utilizzate nel S.R. copernicano per fissare le direzioni degli assi coordinati appartengono alla nostra galassia,il S.R. cosi definito potrà essere preso come S.R.I.,o meglio approssimativamente inerziale, solo quando si tratta del moto di corpi piccoli rispetto alle dimensioni della galassia,come per esempio il sistema solare.

Ma quando si tratta del moto della galassia o di parecchie galassie,il S.R. copernicano non funziona più .

Per costruire un altro sistema approssimativamente inerziale,si possono utilizzare quattro corpi siderali separati gli uni dagli altri da distanze grandi in confronto allo spazio dove si effettua il moto dei corpi considerati.

Il centro di uno di questi corpi siderali può essere preso come origine delle coordinate,gli altri tre corpi saranno utilizzati per fissare le direzioni degli assi coordinati.

OSSERVAZIONE N° 1

Le stelle non sono disseminate a caso nello spazio,ma sono concentrate in vasti sistemi molto distanti gli uni dagli altri,ciascuno dei quali contiene un numero di stelle dell'ordine di 10^{10} . Tali sistemi sono detti GALASSIE; quello che contiene il nostro Sole é noto come la GALASSIA e la VIA LATTEA fa parte della nostra galassia.

Le galassie stesse non sono distribuite completamente a caso,ma presentano una forte tendenza a formare agglomerati: la nostra galassia appartiene ad un gruppo di 19 membri, noto come il GRUPPO LOCALE,che costituisce un sistema fisico legato,cioé vincolato dall'attrazione gravitazionale.

OSSERVAZIONE N°2

Le ipotesi su cui si basa la fisica classica sono:

1°)Lo spazio é euclideo

2°)Lo spazio é ISOTROPO,cioé le proprietà fisiche sono le stesse in tutte le direzioni. LA massa m che compare nell'equazione F =ma , non dipende dalla direzione di a .

3°)Le leggi del moto di Newton valgono in un S.R.I.

Un S.R. solidale con la terra può ritenersi inerziale se teniamo conto delle accelerazioni della terra:

a)nel suo moto attorno al proprio asse

b)nel suo moto attorno al sole

4°)E' valida la legge di gravitazione universale di Newton .

OSSERVAZIONE N° 3

Il principio di relatività classica afferma: " le leggi fondamentali della meccanica sono identiche in tutti i S.R. che si muovono di moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro " .

Con parole diverse possiamo dire che: "le leggi fonda=
=mentali della meccanica hanno la stessa forma in due
S.R. collegati da una trasformazione galileiana ".
Il principio di relatività classica esteso a tutti i
fenomeni fisici costituisce il primo postulato della
relatività ristretta .
Esso può essere enunciato cosi:" le leggi fondamentali della
fisica sono identiche in tutti i S.R. che si muovono di
moto traslatorio rettilineo uniforme" oppure :
"le leggi fondamentali della fisica hanno la stessa
forma in due S.R. collegati da una trasformazione
galileiana ".

Per Einstein lo spazio esiste solo se ci sono corpi che lo occupano, il tempo esiste solo se ci sono fenomeni che si verificano.