

Sistemi di riferimento
e
relatività

Riassunto della puntata precedente:

Definizione di riferimento

Il principio di relatività

Leggi di trasformazione

Il tempo è assoluto?

Tempo assoluto e velocità della luce

Le due ipotesi

La scelta di Einstein

I riferimenti inerziali

Definizione di riferimento

Di solito un *sistema di riferimento* viene identificato con un *sistema di coordinate* (una terna cartesiana). È però meglio dare una definizione di riferimento più fisica.

Un riferimento è un *ambiente fisico*: astrattamente, un corpo rigido, ma in concreto un *laboratorio*, al quale si riferiscono tutte le operazioni di misura.

Misure di posizioni, di tempi, ma anche tutte le altre che possano occorrere.

Il sistema di coordinate è un comodo *ausilio matematico* per individuare le posizioni e per far calcoli; ma lo si può introdurre in più modi nello stesso riferimento fisico, e non è sempre necessario.

Il principio di relatività

Galileo (*Massimi Sistemi*, 1632) enuncia per primo il principio di relatività nella famosissima pagina:

Riserratevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio...

In breve:

se siamo nella nave di Galileo, o più modernamente in un treno che viaggia a velocità costante su un binario rettilineo, *nessun esperimento ci permette di riconoscere se la nave (il treno) si sta muovendo oppure no.*

In linguaggio un po' più astratto:

nessun esperimento permette di distinguere due riferimenti in moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.

Leggi di trasformazione

Il titolo appare solenne, ma vuol dire una cosa semplice: se osserviamo *lo stesso fenomeno* da due diversi riferimenti **S** e **T**, in generale per le grandezze in gioco troveremo *valori diversi* in **S** e in **T**.

Pensiamo per es. alla velocità; ma è vero anche in altri casi: energia, campo magnetico ...

Ci possono essere particolari grandezze che non cambiano valore: le chiameremo *invarianti*.

Attenzione: “invariante” non vuol dire che non cambia *nel tempo*, ma che mantiene lo stesso valore *in diversi riferimenti*.

Esempi? La massa, la carica elettrica ... (ce ne sono altri, ma è meglio non divagare).

Una *legge di trasformazione* è semplicemente la *regola* con cui una certa grandezza cambia da **S** a **T**.

Il tempo è assoluto?

Parlando di tempo, di solito invece di dire “invariante” si dice “assoluto”; ma il concetto è lo stesso.

C'è voluto Einstein per capire che anche a questa domanda si può solo dare risposta su *base sperimentale*.

Ci sono buone ragioni perché non ci si era pensato prima: il fatto è che proprio su basi sperimentali non s'era mai vista nessuna differenza.

Tutte le prove sperimentali andavano in favore del tempo assoluto.

Vada dunque (provvisoriamente) per il tempo assoluto, purché sia chiaro che lo accettiamo non perché è evidente, oppure su basi *filosofiche*; ma solo perché l'*esperienza* così suggerisce.

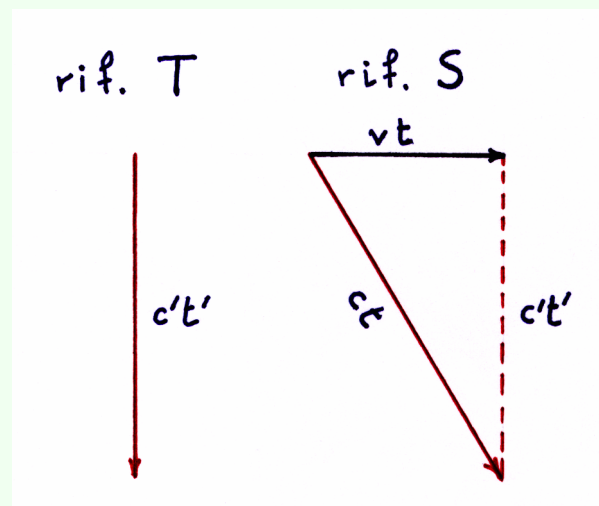
Tempo assoluto e velocità della luce

È facile vedere che *se il tempo è invariante* (assoluto) allora *non può essere invariante la velocità della luce*, e viceversa.

L'esperimento del sasso, rifacciamolo con la luce, e trascuriamo la gravità (potremmo far viaggiare la luce orizzontale, trasversalmente al treno).

Indichiamo con c , c' le due velocità della luce in **S** e in **T** (potranno essere uguali o no: vedremo).

Indichiamo anche (per prudenza) con t , t' i tempi di percorrenza misurati in **S** e in **T**.



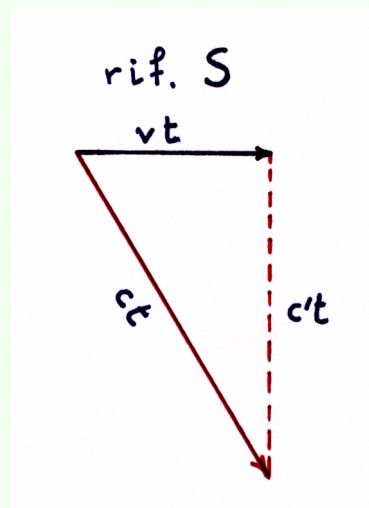
Ipotesi 1: tempo assoluto

Assumiamo il tempo assoluto: $t = t'$.

Allora nello stesso tempo t la luce ha percorso un tratto $c't$ nel riferimento **T**, e un tratto ct nel riferimento **S**.

La figura mostra che ct è più lungo di $c't$: dunque $c > c'$:

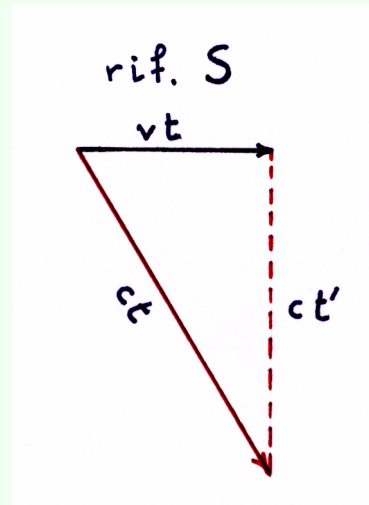
Se il tempo è assoluto, la velocità della luce non è invariante.



Ipotesi 2: velocità della luce invariante

Se $c = c'$ allora la stessa figura, essendo sempre $ct > c't'$, ci mostra che dev'essere $t > t'$:

Se la velocità della luce è invariante, il tempo non è assoluto.



La scelta di Einstein

Sappiamo che Einstein sceglie la seconda ipotesi: velocità della luce invariante, tempo non invariante.

La sua motivazione l'abbiamo già detta: ritiene che il PR debba valere anche per l'elettromagnetismo.

Oggi abbiamo motivi molto più forti, perché il campo dei fenomeni e dei sistemi fisici conosciuti si è molto allargato.

Due esempi:

– *le navicelle spaziali*

– *le stelle.*

I riferimenti inerziali

Il PR asserisce l'equivalenza di tutti i riferimenti in moto *traslatorio rettilineo uniforme* (TRU) uno rispetto all'altro.

Che cosa si può dire di due riferimenti in moto relativo *non* TRU?

In generale non sono equivalenti: può darsi che uno sia “buono” e l'altro “cattivo”?

I riferimenti buoni si chiamano “inerziali”, ma non è proprio facile definirli...

Riferimenti non inerziali: due tipi diversi

a) Rif. in moto *traslatorio accelerato* rispetto a un RI

b) Rif. in moto *rotatorio*

Supponiamo di poter trattare la Terra come RI: allora un esempio di a) può essere un treno che accelera o frena su un binario rettilineo.

Ma anche una cabina della grande ruota del Prater di Vienna lo è: solo che in questo caso il moto è circolare, quindi accelerato, ma sempre traslatorio.

Infatti tutti i punti di una cabina a un dato istante *hanno la stessa velocità e la stessa accelerazione* (vettori).

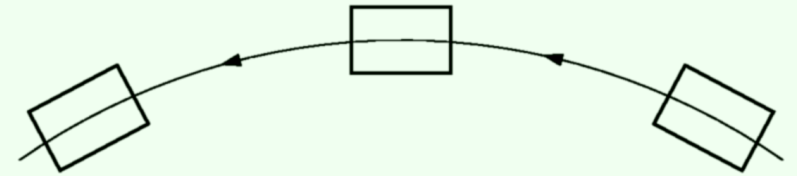
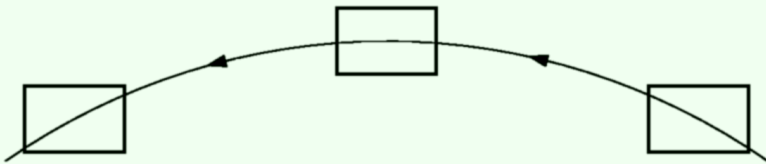
Esempio di b) è invece una giostra.



Satelliti ecc.

Un esempio di *a)* sarebbe un satellite artificiale che orbita attorno alla Terra conservando *orientamento costante rispetto alle stelle*.

Come esempio di *b)* basta pensare alla Luna, che *mostra sempre la stessa faccia* alla Terra (circa).



Nell'ambito del sistema solare si trovano poi quanti esempi si vuole che non sono né *a)* né *b)*: a cominciare dai pianeti.

Come usare i due casi semplici

Il caso *a*) (moto traslatorio) lo useremo nel seguito, per illustrare il *principio di equivalenza*.

Il caso *b*) è quello dove ha senso parlare di *forza centrifuga*: non ne avremo bisogno, ma è bene cogliere l'occasione per sottolineare questo fatto.

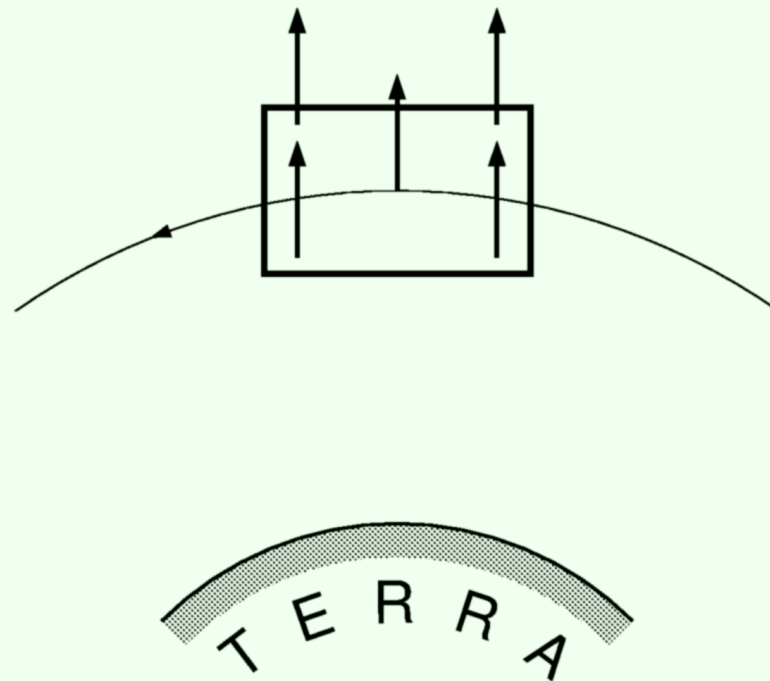
È purtroppo assai frequente sentir parlare di “forza centrifuga che equilibra la forza centripeta”, oppure di “Luna che non cade sulla Terra perché la forza centrifuga fa equilibrio alla gravità”, ecc.

Bisogna mettere bene in chiaro che per studiare un moto *va prima di tutto stabilito il sistema di riferimento*: se questo è inerziale, *non c'è nessuna forza centrifuga*; e se il moto è per es. circolare, una forza diretta verso il centro è *necessaria* per avere quel moto.

Nel caso della Luna la forza necessaria (centripeta) è rappresentata dall'attrazione gravitazionale della Terra.

Forze apparenti nel moto traslatorio

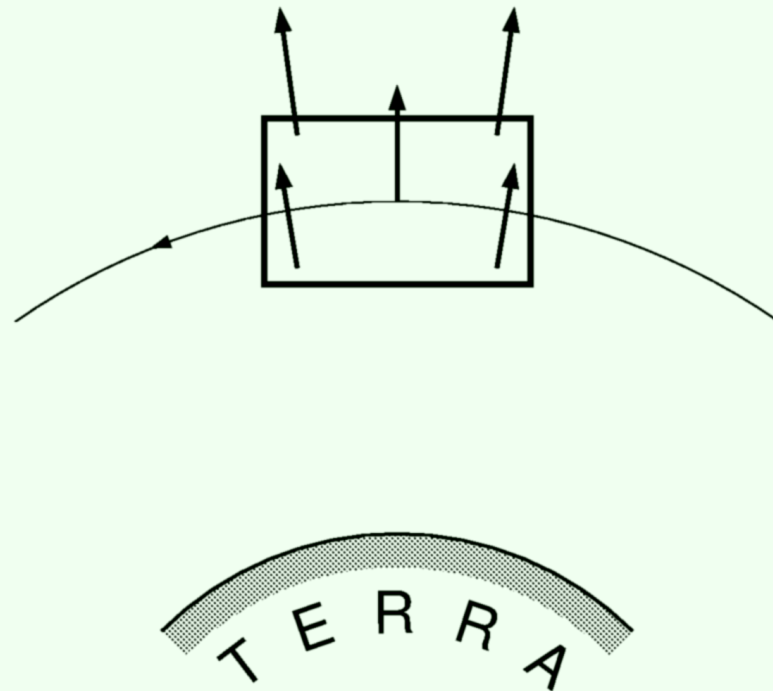
Qualunque sia il tipo di moto (rettilineo oppure no) nel caso traslatorio l'accelerazione è *la stessa in ogni punto*, e lo stesso è vero quindi per la forza apparente $-m a$.



Forze apparenti nel moto rotatorio

In questo caso l'accelerazione è sempre diretta in direzione radiale, verso l'asse di rotazione. La sua grandezza è proporzionale alla distanza dall'asse.

Perciò la forza apparente $-m a$ ha la stessa direzione ma verso l'esterno, ed ha anch'essa intensità proporzionale alla distanza dall'asse.



La caduta dei gravi

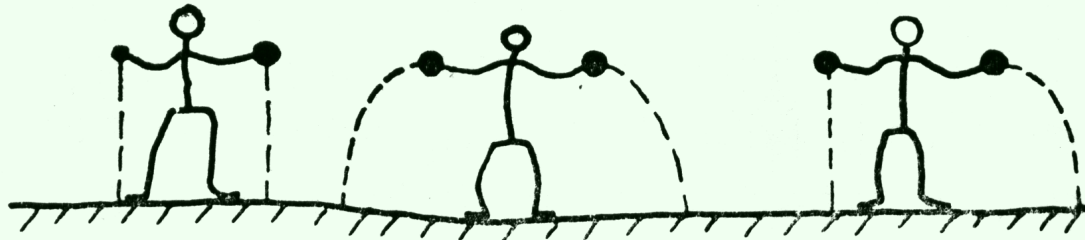
La scoperta di Galileo:

*tutti i gravi cadono di moto uniformemente accelerato,
con la stessa accelerazione*

è talmente nota che finisce per essere considerata quasi banale.

Ma vediamo che cosa ne dice Rogers, in *Physics for the Inquiring Mind* (Princeton 1960):

*Prendete due sassi diversi (o due monete), e fateli cadere, lasciandoli insieme.
Poi fateli cadere di nuovo, ma questa volta con una spinta orizzontale.
Poi lanciatene uno in fuori, mentre l'altro cade verticalmente.
Guardate e riguardate quello che succede.*



Se tutto ciò vi sembra una puerile perdita di tempo, considerate quanto segue:

a) Questo è sperimentare. Tutta la scienza è costruita sulle informazioni tratte da esperimenti diretti come i vostri.

b) Per un fisico l'esperimento in cui si fanno cadere insieme sassi leggeri e pesanti non è solo una leggenda storica; esso mostra un fatto semplice ma stupefacente, che è un piacere vedere e rivedere.

Il fisico che non gioisce nel vedere un euro e un cent che cadono insieme, è senz'anima.

Mito e Simbolo

Ancora Rogers:

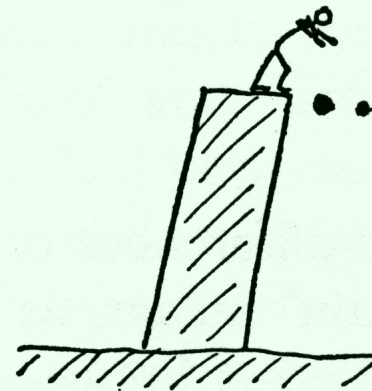
Si racconta che Galileo abbia dato una dimostrazione pubblica lasciando cadere un oggetto leggero e uno pesante dalla cima della Torre Pendente di Pisa. (C'è chi dice che fece cadere una palla di ferro e una di legno; altri dicono invece che fossero due palle di ferro, una di una libbra e l'altra di cento libbre.)

[...]

Molti miti sono associati alle grandi figure della storia: alberi di ciliegio, torte bruciate ecc.

[...]

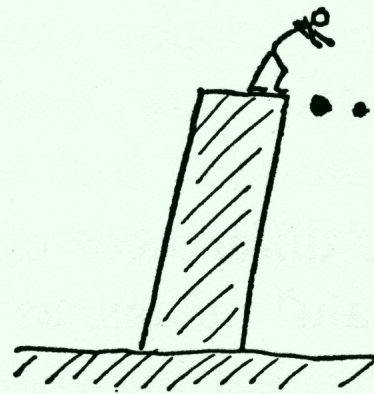
Eppure noi potremo usarla, a parte Galileo e lo sviluppo della scienza, come simbolo di un esperimento semplice. Nel vostro esperimento coi due sassi, essi cadono circa insieme, e non – come qualcuno si aspetta – quello pesante molto più veloce dell'altro.



MYTH
&
SYMBOL

Nel nostro corso useremo questo Mito e Simbolo per ricordare due cose:

- la necessità di sperimentare direttamente*
- un fatto sorprendente, semplice e importante riguardo alla gravità.*



MYTH
&
SYMBOL

Da Galileo ad Einstein

Tutto questo era dunque ben noto già a Galileo, e Newton ne aveva fatto tesoro; che cosa ha aggiunto Einstein?

E. si chiede: che cosa significa questo “fatto sorprendente, semplice e importante”? Perché succede?

Se tutti i corpi cadono allo stesso modo, si può pensare che la gravità non sia una proprietà dei corpi, ma *dello spazio in cui si trovano* (dovremmo dire “dello spazio-tempo”, ma ancora non possiamo...).

(È questo che s'intende quando si parla di “geometrizzazione della gravità”.)

Per capire meglio, usiamo il famoso “esempio dell'ascensore”.

L'ascensore di Einstein

Se un ascensore che cade senza freni, l'accelerazione di caduta è g ; perciò la forza apparente sulla pallina vale $-m g$, opposta al peso.

Ne segue che la pallina resta ferma: è “senza peso”.

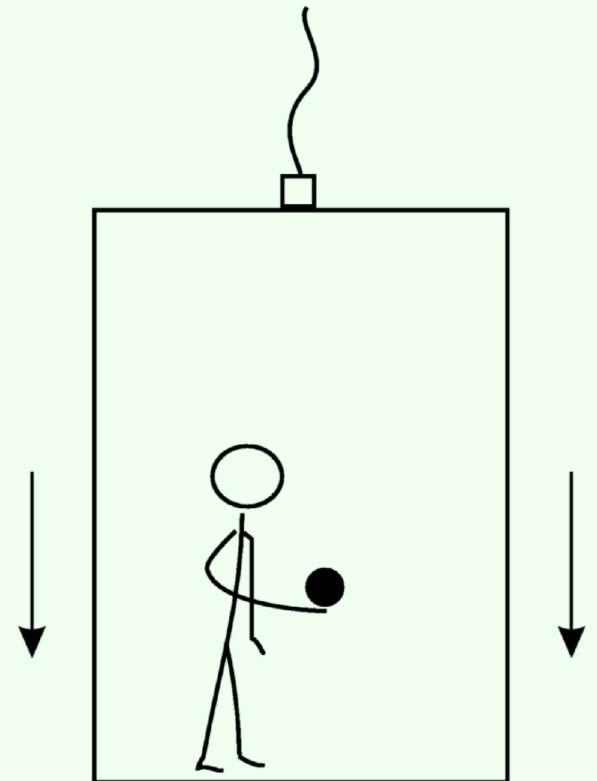
In altre parole, per un fisico dentro l'ascensore *la gravità non c'è*.

In termini più astratti:

L'ascensore in caduta libera equivale a un rif. inerziale in assenza di gravità.

Questa equivalenza era già nota: per es. Newton ne fa uso esplicito nei *Principia*.

Ma era limitata all'ambito meccanico.



Il principio di equivalenza

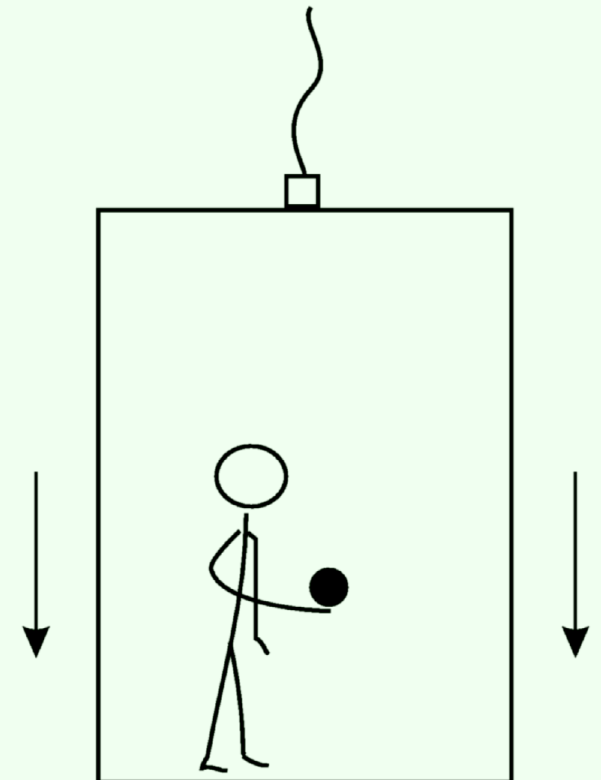
Einstein si spinge ad affermare che l'equivalenza ha carattere universale:

Un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale equivale a tutti gli effetti fisici a un riferimento inerziale in assenza di gravità.

E simmetricamente:

Un riferimento in moto traslatorio accelerato equivale a tutti gli effetti fisici a un rif. fermo in un campo gravitazionale.

Esempio: un'astronave che viaggi nello spazio profondo, lontana da qualsiasi corpo, coi motori accesi che le danno un'accelerazione g , equivale all'astronave ferma sulla rampa di lancio.



Applicazioni del principio di equivalenza

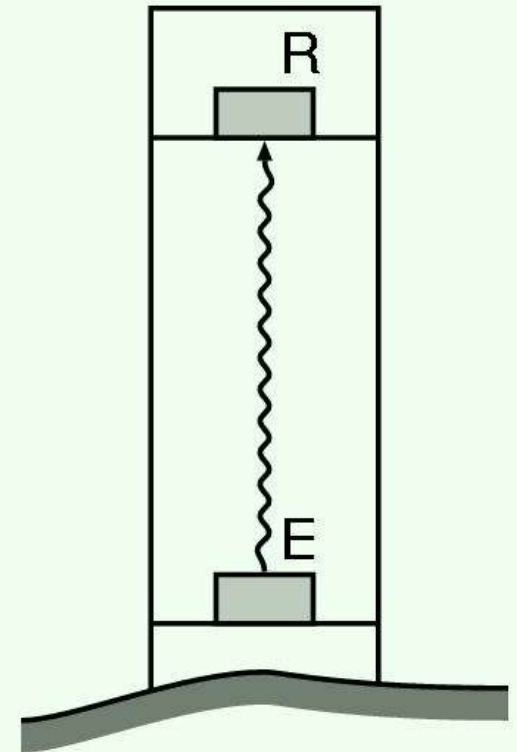
La prima applicazione del PE è il *redshift gravitazionale* (1911).

Confrontando due esperimenti uguali, in cui la radiazione si propaga “verso l'alto”, fatti uno sulla Terra e l'altro nell'astronave accelerata, E. dimostra che *la frequenza della radiazione ricevuta sarà minore di quella emessa*.

(Va da sé che E. non parla di astronavi...)

La prima verifica sperimentale è stata fatta solo nel 1960 (Pound e Rebka).

Una seconda applicazione è la *deflessione gravitazionale* della luce; ma questa è una storia un po' complicata, e il tempo non mi permette di parlarne...



Breve parentesi storica

Quando Einstein inizia la ricerca sulla RG ha in mente di superare lo status privilegiato dei riferimenti inerziali: vuole costruire una teoria valida per un riferimento in moto qualsiasi.

Strada facendo, s'imbatte nell'equivalenza tra gravità e forze apparenti, introduce la geometrizzazione della gravità, e alla fine si trova ad aver fatto tutt'altro di quello che si proponeva all'inizio.

Ha invece costruito una *teoria relativistica della gravità come proprietà geometrica dello spazio-tempo*.

L'equivalenza è solo locale

L'equivalenza tra l'ascensore in caduta libera e un riferimento inerziale *non è esatta*.

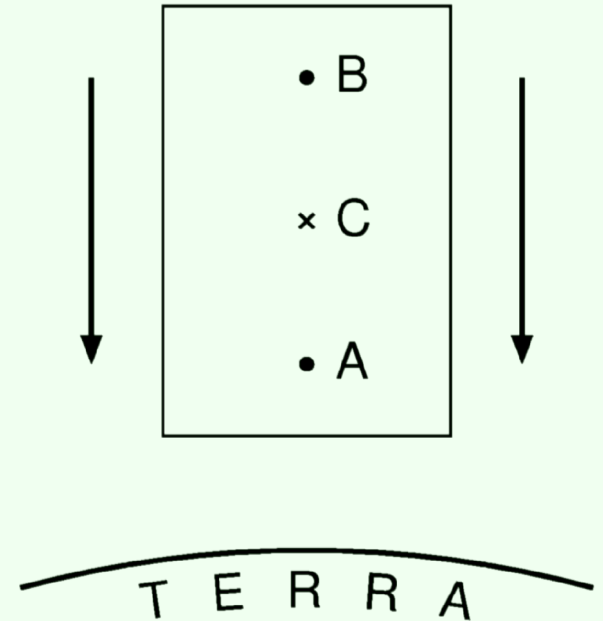
Il campo gravitazionale in A è più intenso che in C, mentre in B è meno intenso; quindi la pallina A cade con accelerazione maggiore dell'ascensore, quella in C con accelerazione minore.

Nel riferimento dell'ascensore la pallina A è accelerata *verso il basso*, B *verso l'alto*.

Perciò la gravità non si cancella esattamente, e il rif. dell'ascensore non equivale a un rif. inerziale in assenza di gravità.

O meglio, l'equivalenza è *approssimata*: con approssimazione tanto migliore quanto più le dimensioni della cabina sono piccole.

Per questo motivo si parla di equivalenza “locale”.



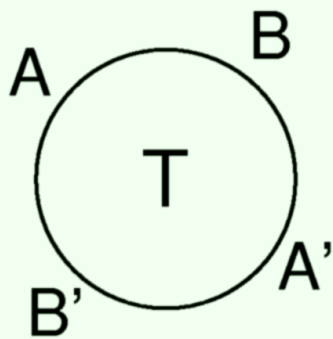
La forza di marea

Il residuo di forza di gravità si chiama “forza di marea”, perché fornisce la spiegazione delle maree.

La Terra “cade” verso la Luna, e il campo gravitazionale della Luna in A è più intenso che al centro della Terra, mentre in A' è più debole: come nell'ascensore.

Se non ci fosse il campo della Terra, una pallina in A si muoverebbe verso la Luna, e una in A' si allontanerebbe in verso opposto.

Ⓛ



Invece succede solo che le due palline *pesano meno* che se la Luna non ci fosse.

Per questa ragione l'acqua in A e in A' si solleva (alta marea).

In B e in B' si abbassa, ma non ho spiegato perché...

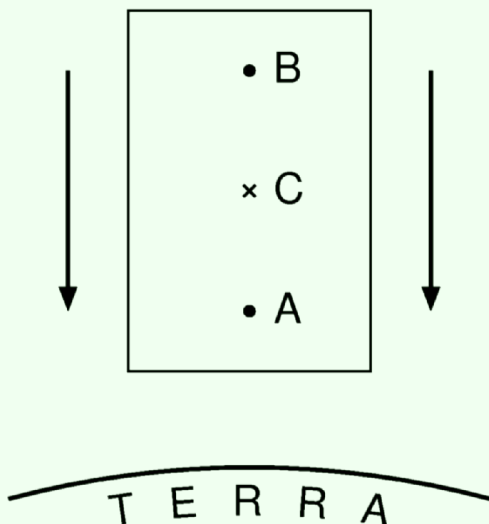
La curvatura dello spazio-tempo

La forza di marea permette di arrivare in modo elementare alla curvatura dello spazio-tempo.

Il grafico a destra mostra i diagrammi orari delle due palline A e B: una accelera verso l'alto, l'altra verso il basso.

I due diagrammi *si allontanano*.

Basta interpretare questo fatto come una *deviazione di due geodetiche* nello spazio-tempo, ed è fatta.



Purtroppo il tempo non ce lo consente...

