

Onde, Radiazione e Relativita'

XIV – Principio di equivalenza (Cenni)

Principio di relativita': Replay

Sistemi di Riferimento Inerziali (quelli in cui un corpo non soggetto a forze si muove di moto uniforme) tutti equivalenti

Osservatori in SRI diversi trovano la stessa forma per tutte le leggi fisiche

Non esistono velocita' assolute

Difficolta' di principio a definire cosa sia un SRI (occorrerebbe conoscere tutte le forze...)

L'insoddisfazione di Einstein - I

Dopo la relativita' ristretta, rimane un problema:

La gravitazione newtoniana non va d'accordo con le trasformazioni di Lorentz

P.es., \mathbf{F} dipende da d , e d e' diversa in SRI diversi ...

Per altro, la gravitazione newtoniana spiega un'enorme quantita' di fatti sperimentali (con alcune minime eccezioni: vedi dopo..)

Che fare?

L'insoddisfazione di Einstein - II

Un'altra questione, apparentemente scorrelata:
Le accelerazioni sono assolute?

Esperimento del secchio d'acqua (Newton):

Superficie libera = Piano

quando l'acqua e' ferma

Superficie libera = Paraboloide

quando l'acqua e' in rotazione

rispetto alla Terra

Sembrerebbe di si'....

Ma allora dovremmo credere allo spazio assoluto: Assurdo?

(Newton: no, lo spazio e' quello della geometria: assoluto)

(Mach: si', lo spazio esiste solo perche' esistono i corpi: relativo)

L' uovo di (Colombo) Einstein

Berna, Ufficio Brevetti, 1907: "Il pensiero piu' felice della mia vita"
Una persona in caduta libera non sente il proprio peso



In caduta libera, sentiamo "zero g "!

L'origine dell'idea - I

Questione risalente all'origine della fisica, aristotelica e galileiana:
Il moto dei gravi dipende dalla loro massa?

Per rispondere, come al solito, un'altra domanda:

Cos'è la massa?

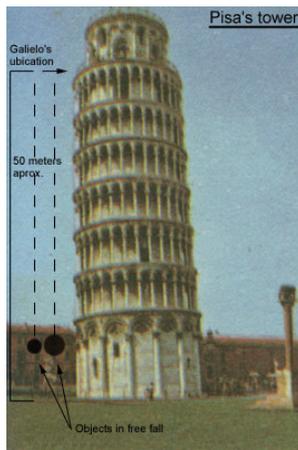
Due risposte newtoniane:

Inerzia (misura della resistenza dei corpi ai tentativi di cambiarne lo stato di moto) → *Massa inerziale*

Gravità (misura dell'intensità dell'attrazione gravitazionale fra i corpi, analoga alla carica elettrica) → *Massa gravitazionale*

L'origine dell'idea - II

In principio, nessun motivo perche' le due grandezze debbano essere identiche: Lo sono?



Galileo sulla torre di Pisa (leggenda?):

Sfere di massa diversa cadono nello stesso tempo

$$\cancel{m_i} \frac{dv}{dt} = \cancel{m_g} g$$

$$\rightarrow \frac{dv}{dt} = g \text{ indipendentemente dalla massa entro } \sim 10^{-2}$$

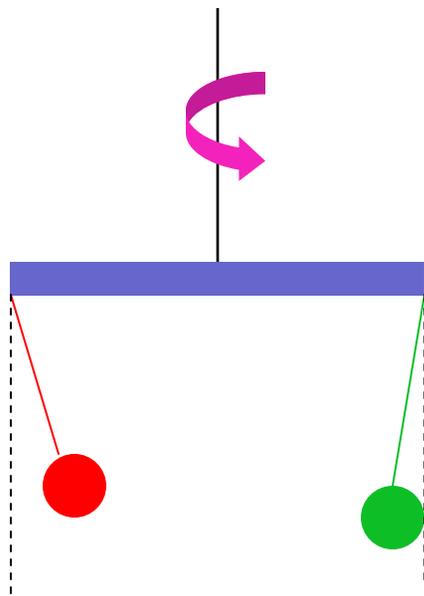
Eotvos (fine '800-inizio '900): Bilancia di torsione

$$\left| \frac{m_i - m_g}{m_i + m_g} \right| \leq 10^{-9}$$



L'origine dell'idea - III

Eotvos e la bilancia di torsione



$m \sim m$
Materiali diversi

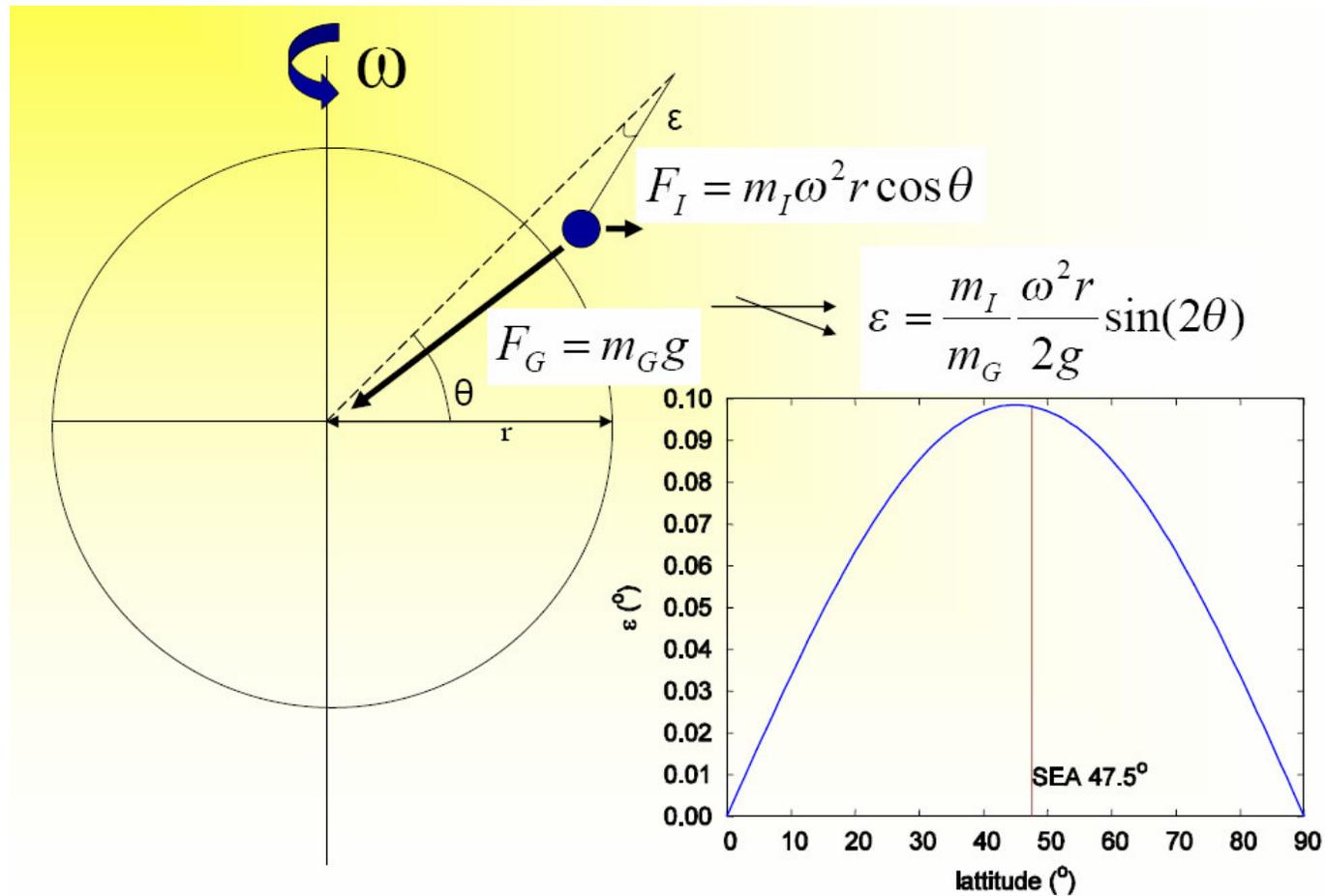
Violazione del Principio di equivalenza:

$$m_i \neq m_g \rightarrow m_i/m_g \neq m_i/m_g$$

- Direzioni della linea a piombo diverse
- Momento meccanico sull'asse
- Torsione

L'origine dell'idea - IV

Eotvos: Effetto atteso



Un nuovo punto di vista

Sistema di punti materiali, immersi in un campo gravitazionale uniforme:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{g} \quad \text{Eq. del moto per punto } i\text{-esimo}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2} \mathbf{g} t^2 \quad \text{Posizione di un osservatore in caduta libera}$$

$$\rightarrow \frac{d^2 \mathbf{r}'_i}{dt^2} = \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} - \frac{d^2 \mathbf{R}_i}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} \quad \text{Eq. del moto rispetto all'osservatore in c.libera}$$

Quindi, restando nel limite di proprietà *locali*:

Dinamica in sistemi di riferimento accelerati

=

Dinamica in campi gravitazionali

Principio di equivalenza

Nella sua versione *debole* stabilisce che:

Massa inerziale e massa gravitazionale sono identiche

Quindi:

Gli effetti dinamici (locali) di un campo gravitazionale e di un riferimento accelerato sono identici.

Nella versione *forte*:

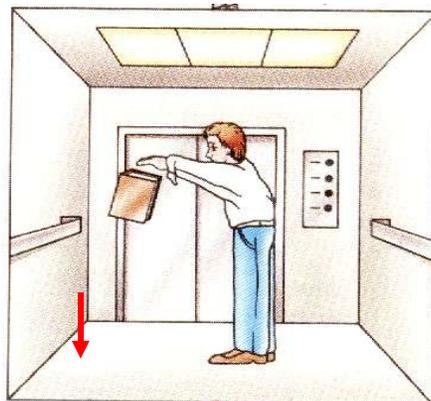
Per descrivere il moto in un campo gravitazionale arbitrario, e' sempre possibile scegliere (localmente) un SRI

Principio di relativita' (generale)

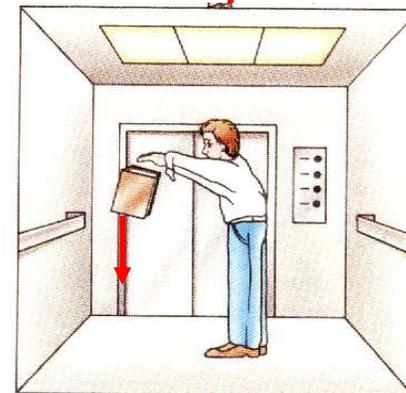
Sistemi di riferimento, inerziali e non inerziali, tutti equivalenti

Osservatori in sistemi di riferimento diversi trovano la stessa forma per tutte le leggi fisiche

Sulla Terra:
 $g = 9.8 \text{ m/s/s}$



Nello spazio:
 $a = 9.8 \text{ m/s/s}$



Stesse
conclusioni!

Una conseguenza stupefacente

Consideriamo due osservatori, in quiete ad altezza diversa (differenza = h) in un campo gravitazionale \mathbf{g} : il potenziale gravitazionale sarà diverso per i due. In base al principio di equivalenza, la situazione è equivalente ad avere i due osservatori in moto accelerato, ed è sempre possibile considerare per essi un SRI istantaneo. Ora, se il I osservatore emette un impulso luminoso all'istante $t = 0$, il II osservatore lo riceve all'istante $t = h/c$, nel quale ha raggiunto la velocità $v = gt = gh/c$. Quindi ci aspettiamo che il II osservatore trovi il solito Doppler shift nella frequenza della luce:

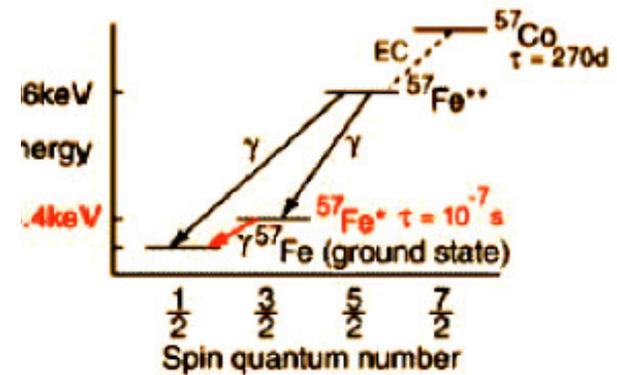
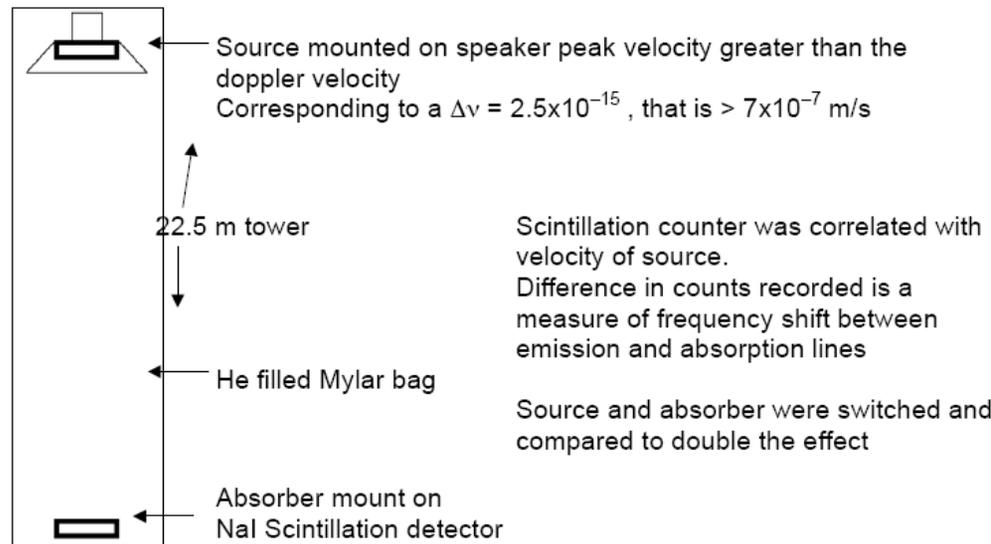
$$\nu_{II} = \nu_I \left(1 + \frac{v}{c} \right) = \nu_I \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right)$$

Se consideriamo la emissione/ricezione di n impulsi: $n = \nu_I \delta t_I = \nu_{II} \delta t_{II}$

$$\rightarrow \delta t_I = \delta t_{II} \frac{\nu_{II}}{\nu_I} = \delta t_{II} \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right)$$

Orologi a potenziale gravitazionale diverso vanno a ritmo diverso!

Esperimento di Pound & Rebka



Il rivelatore conta i gamma solo quando non c'è shift in frequenza fra emissione e assorbimento:

Sorgente montata su altoparlante eccitato a frequenza audio (~ 10 Hz)

Si registra rateo di conteggio vs. tempo

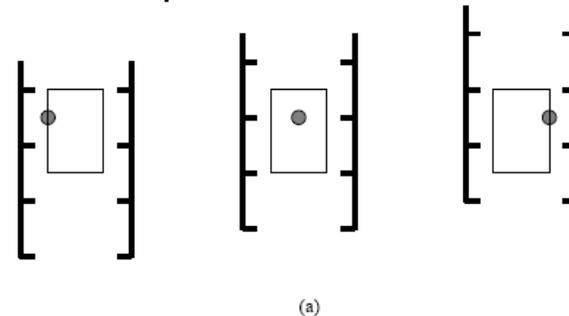
→ Si verifica che il rateo è max. quando la velocità della sorgente verso il basso compensa il *red-shift gravitazionale*

Un' altra strana conseguenza

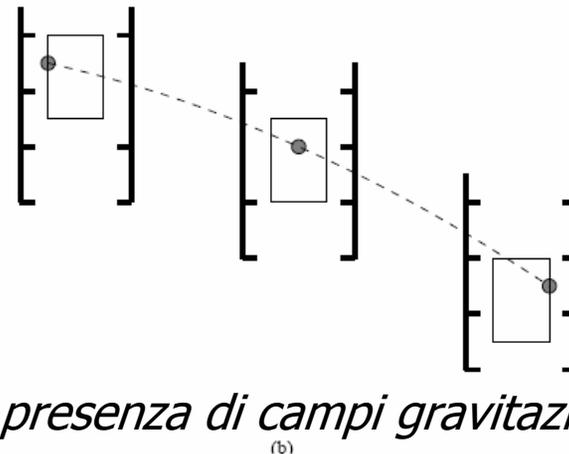
'Ascensore di Einstein' (in caduta libera in un c.gravitazionale uniforme g):

- Impulso luminoso

SRI (istantaneo) dell'ascensore:
Sempre lo stesso ($v=cost=0$)
→ Traiettoria rettilinea

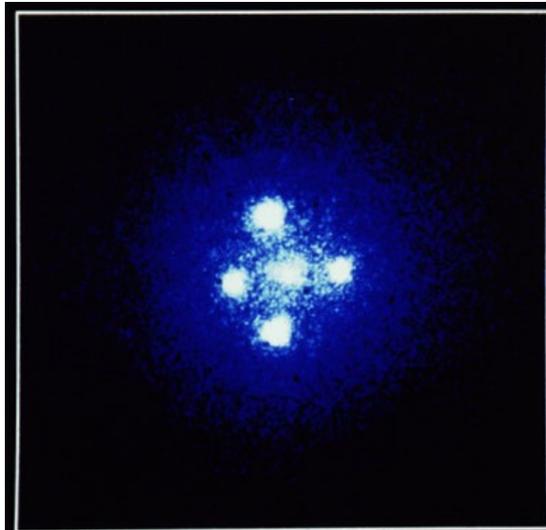


SRI (istantaneo) del palazzo:
Cambia istante per istante ($v \neq cost$)
→ Traiettoria curvilinea

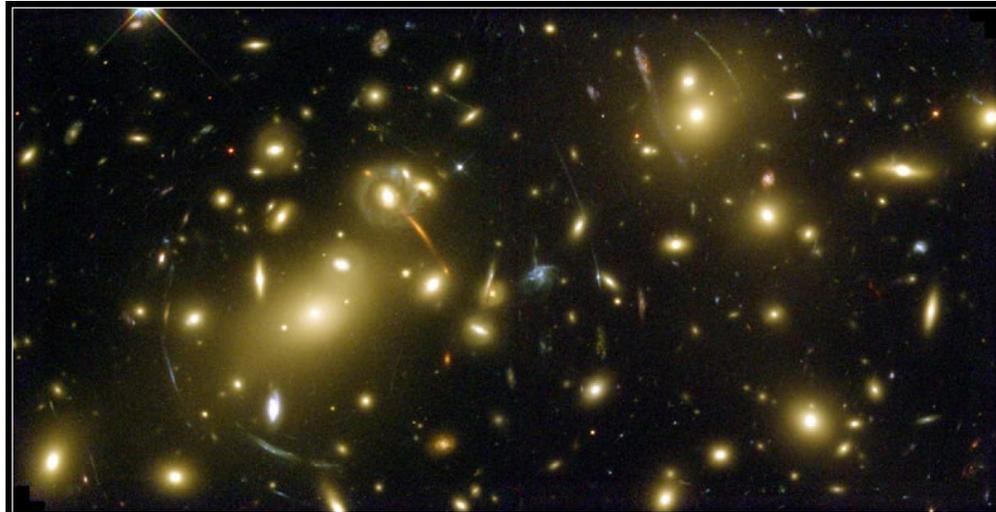


Morale: *la luce segue percorsi curvi in presenza di campi gravitazionali!*

Stupefacente!



Gravitational Lens G2237+0305



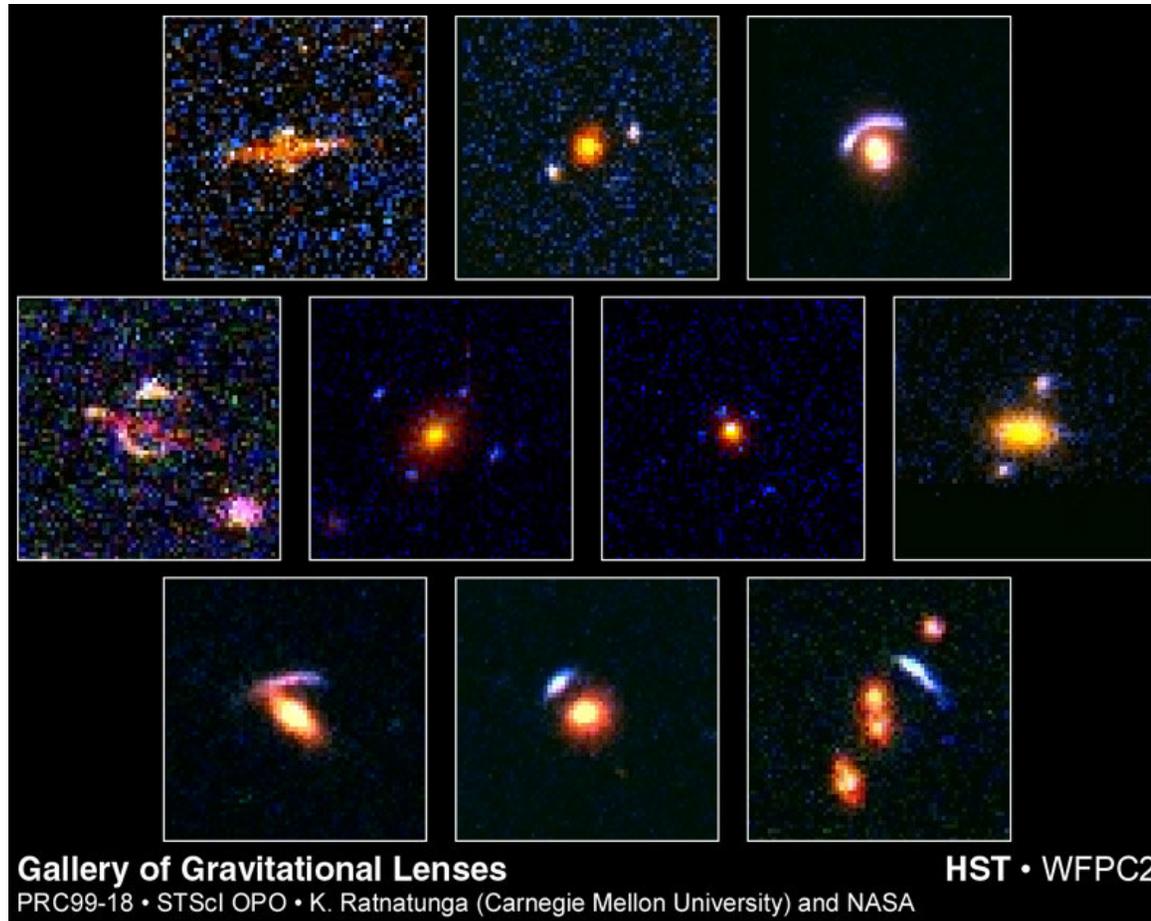
Galaxy Cluster Abell 2218

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2

Lensing gravitazionale: Immagini multiple di galassie

La Galleria degli Specchi di Einstein



E allora?

Dobbiamo cambiare ancora una volta molte delle nostre idee sullo spazio e sul tempo

Questa volta, il percorso e' molto piu' accidentato, e la matematica e' assai piu' ardua

Ma il gioco vale la candela...

Arrivederci alla prossima puntata!