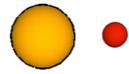


LA RELATIVITÀ GENERALE: SPAZIOTEMPO CURVO

Alessandro Tomasiello

Galileo [-1610]: la gravità ha lo stesso effetto su corpi di massa diversa

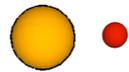


Pisa??

Galileo [-1610]: la gravità ha lo stesso effetto su corpi di massa diversa



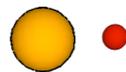
Pisa??



Galileo [-1610]: la gravità ha lo stesso effetto su corpi di massa diversa



Pisa??



Apollo 15 [1971]

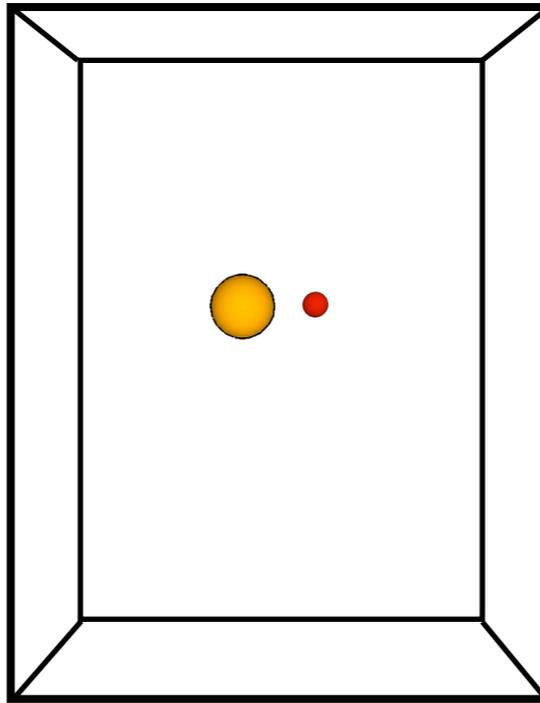


martello

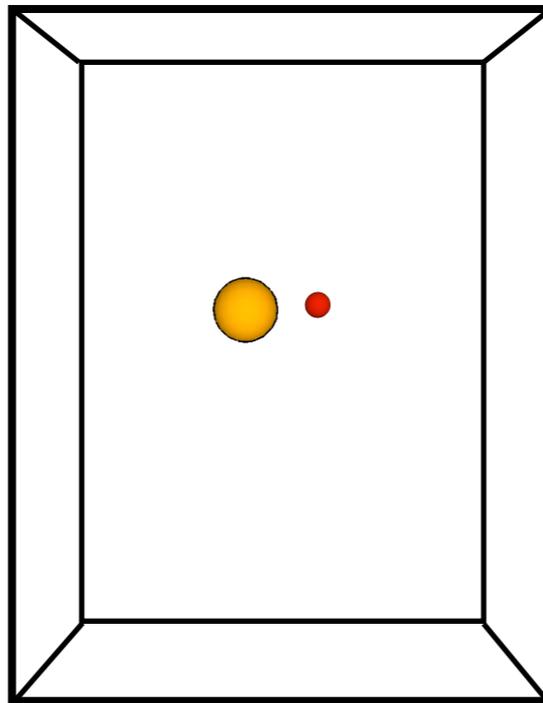
piuma

...e innumerevoli altri esperimenti

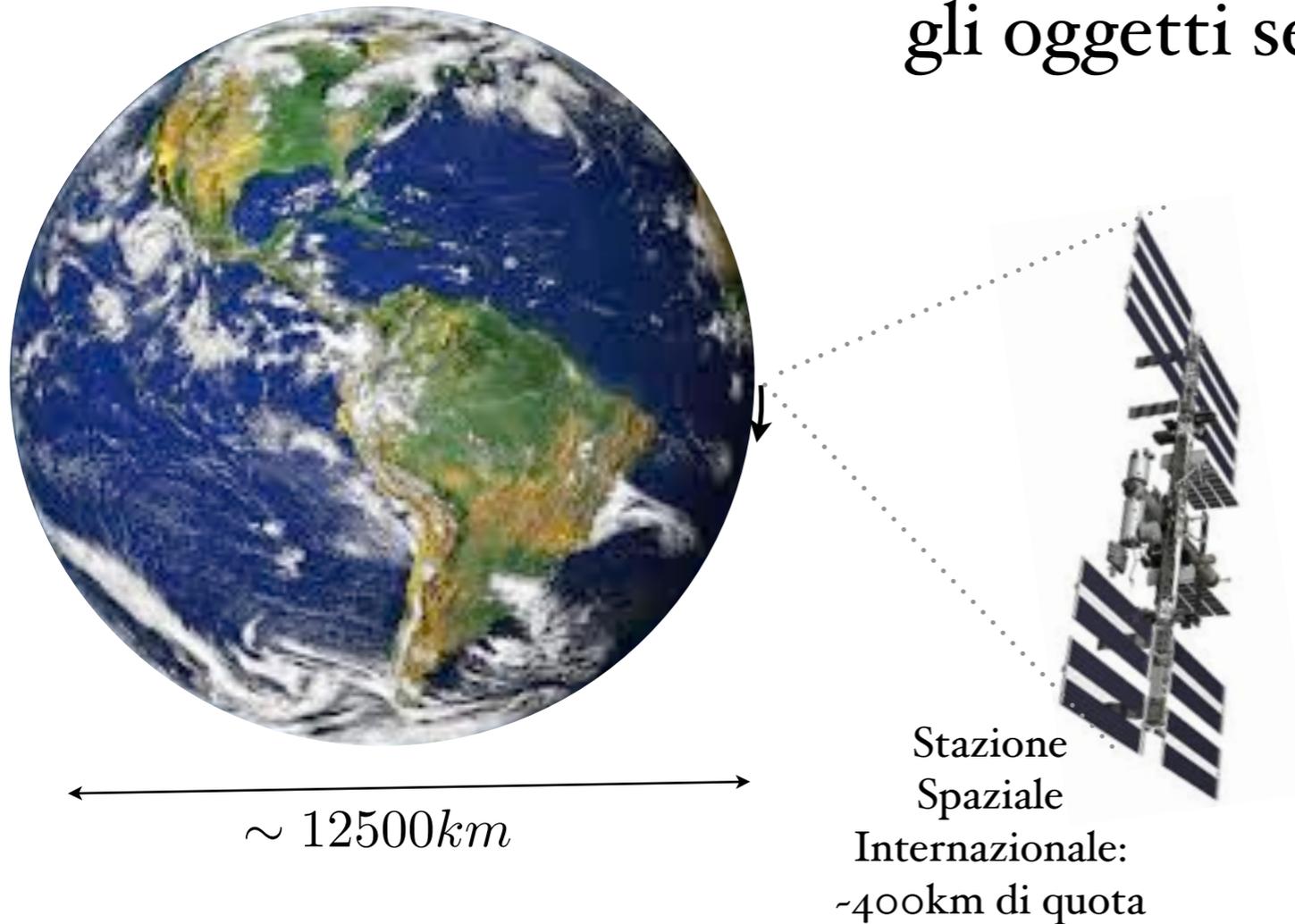
Quindi per un osservatore dentro una scatola in caduta
gli oggetti non sembrano cadere



Quindi per un osservatore dentro una scatola in caduta
gli oggetti non sembrano cadere



Per la stessa ragione, anche in una scatola **in orbita**
gli oggetti sembrano non cadere...



anche se la forza di gravità è
quasi forte quanto a terra!

Per la stessa ragione, anche in una scatola **in orbita**
gli oggetti sembrano non cadere...



← ~ 12500km →

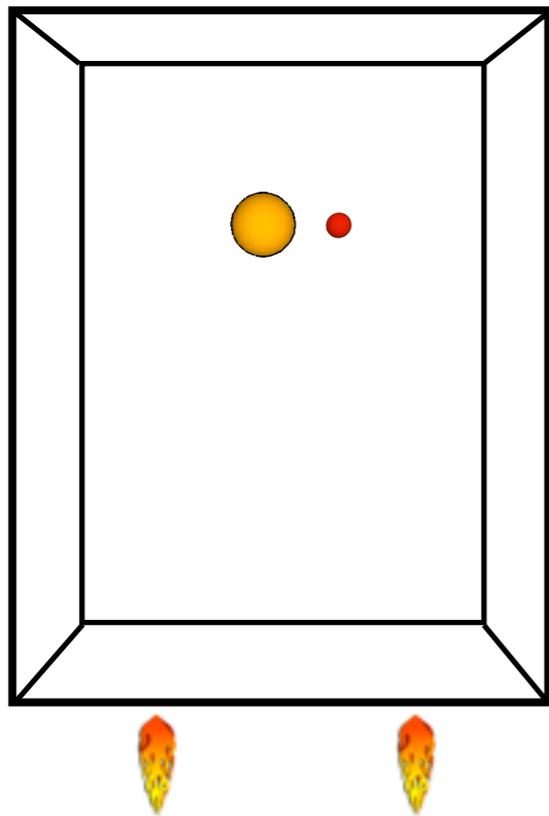


Stazione
Spaziale
Internazionale:
~400km di quota

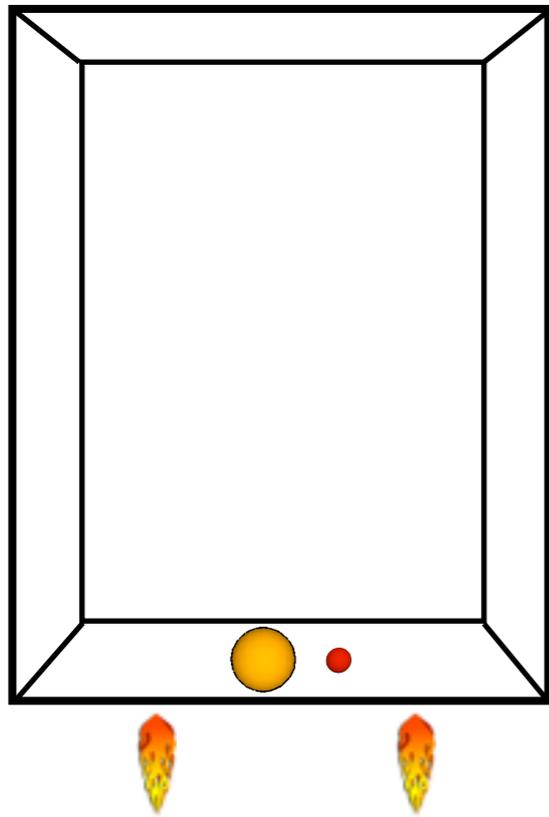
anche se la forza di gravità è
quasi forte quanto a terra!

D'altra parte, in una scatola accelerata dall'esterno
sembra essere presente la gravità

per un osservatore all'interno,
è come se gli oggetti fossero caduti



D'altra parte, in una scatola accelerata dall'esterno
sembra essere presente la gravità



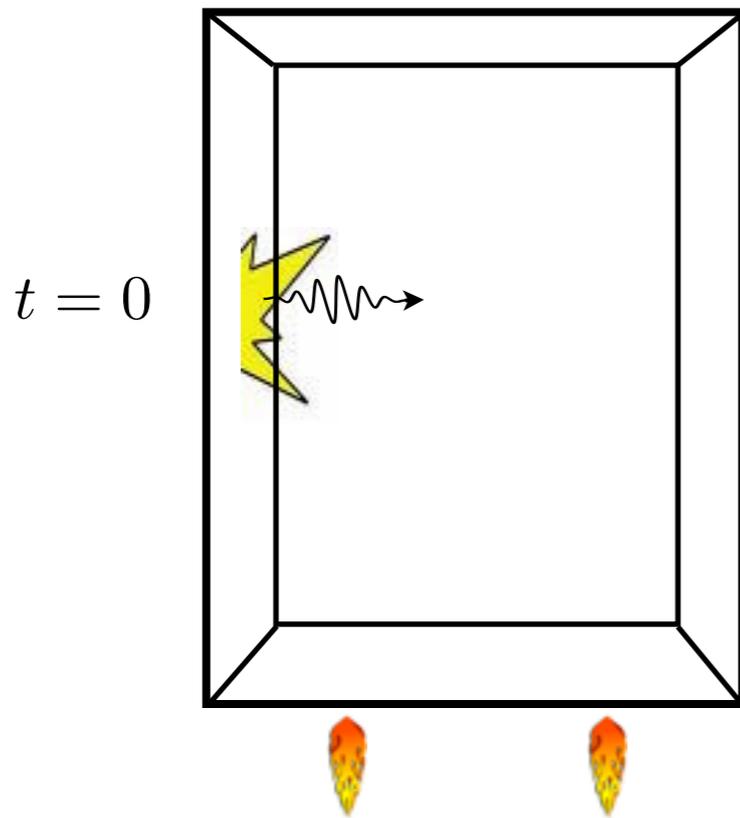
per un osservatore all'interno,
è come se gli oggetti fossero caduti

Einstein [1907] postula che **in generale**
“la gravità è relativa”

La sua presenza o meno dipende dall'osservatore!
Va considerata su uno stesso piano di una forza 'apparente'
dovuta a un'accelerazione esterna

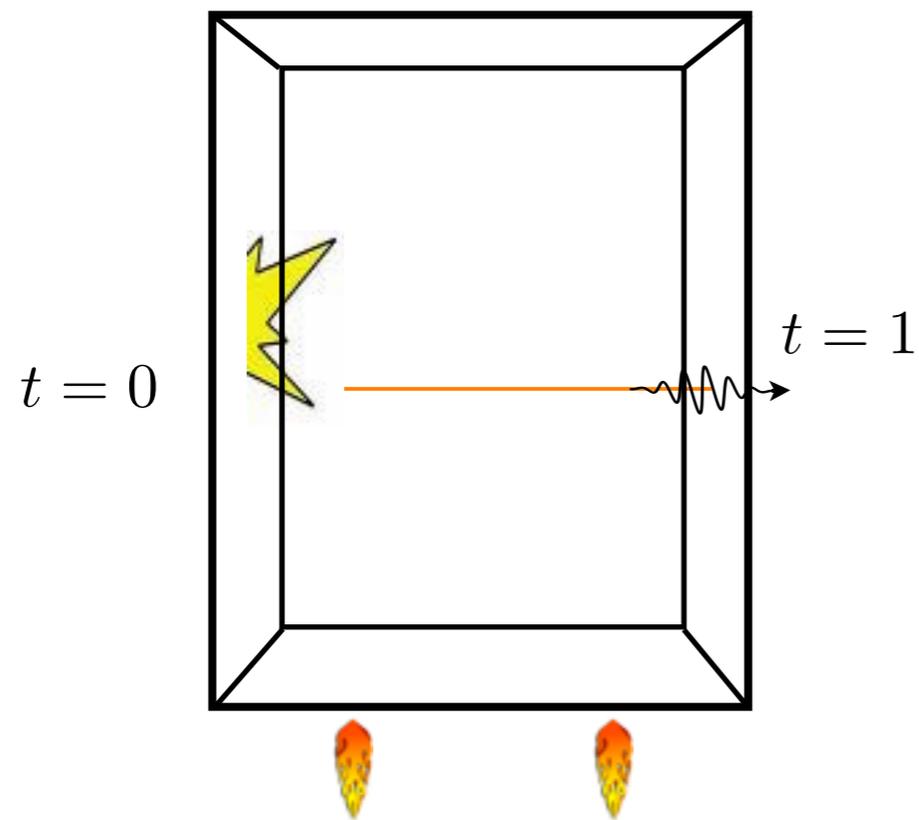
Esploriamo le conseguenze **logiche**
di questo postulato

raggio di luce
in una scatola accelerata:



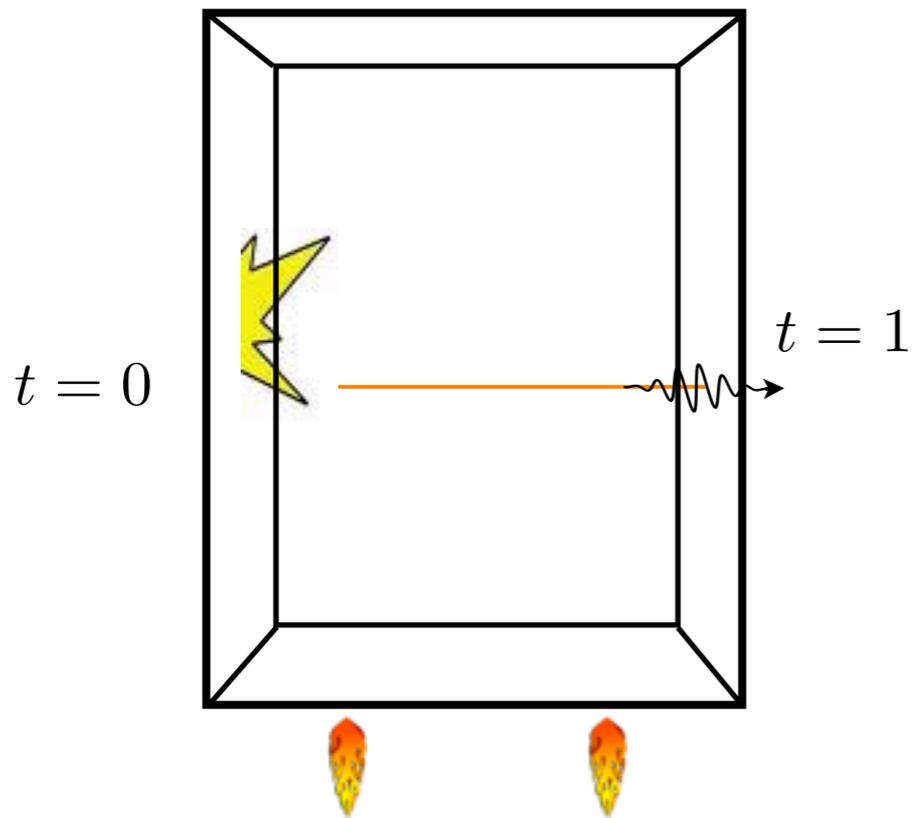
Esploriamo le conseguenze **logiche**
di questo postulato

raggio di luce
in una scatola accelerata:

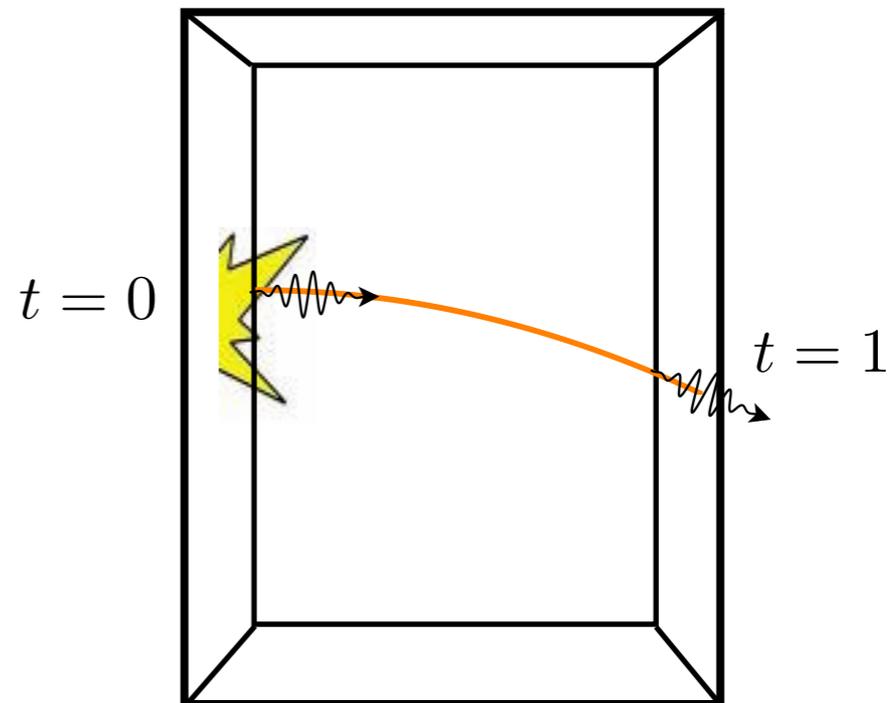


Esploriamo le conseguenze **logiche**
di questo postulato

raggio di luce
in una scatola accelerata:

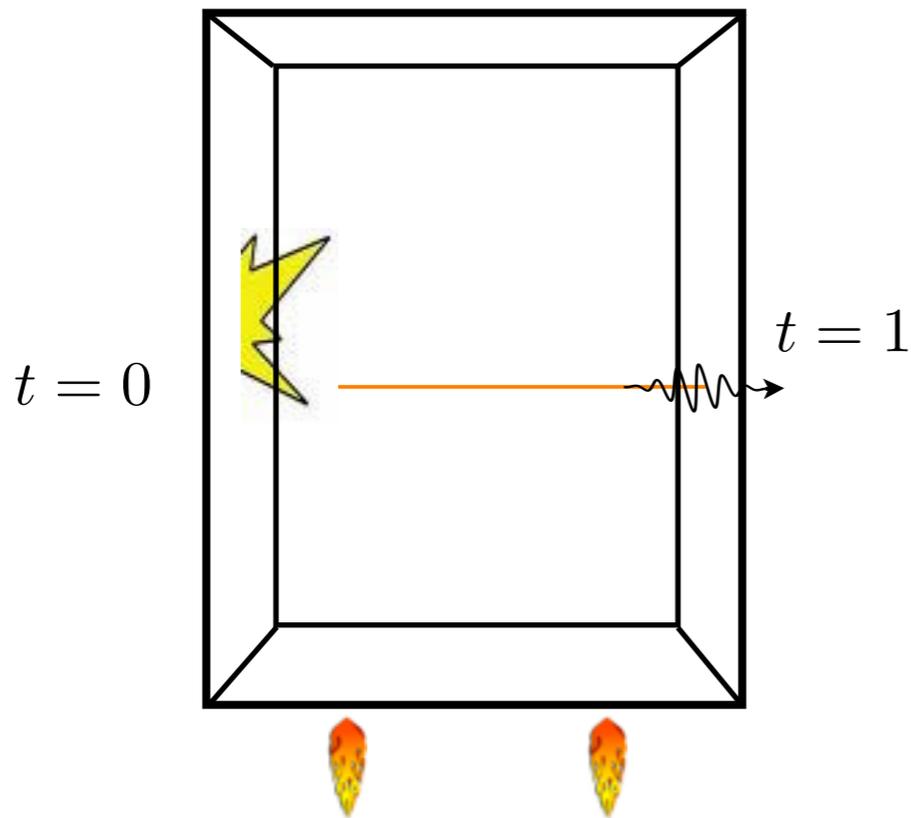


dal punto di vista
di un osservatore nella scatola:

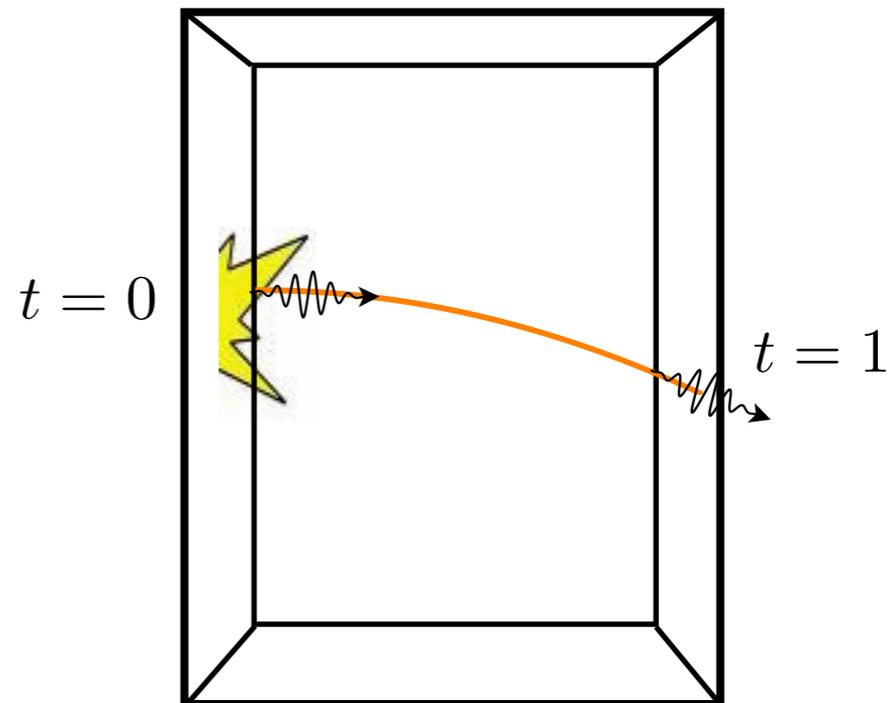


Esploriamo le conseguenze **logiche**
di questo postulato

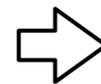
raggio di luce
in una scatola accelerata:



dal punto di vista
di un osservatore nella scatola:



Ma accelerazione=gravità



La luce è curvata
dalla gravità!

Addirittura può curvare la luce tanto da non farla più uscire:

Addirittura può curvare la luce tanto da non farla più uscire:

Buco nero!



[un po' di immaginazione...]

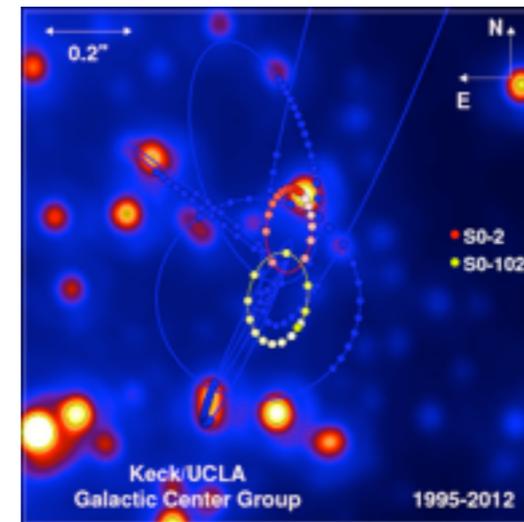
Addirittura può curvare la luce tanto da non farla più uscire:

Buco nero!



[un po' di immaginazione...]

[osservazioni vere! stelle che orbitano
attorno a un punto 'invisibile']



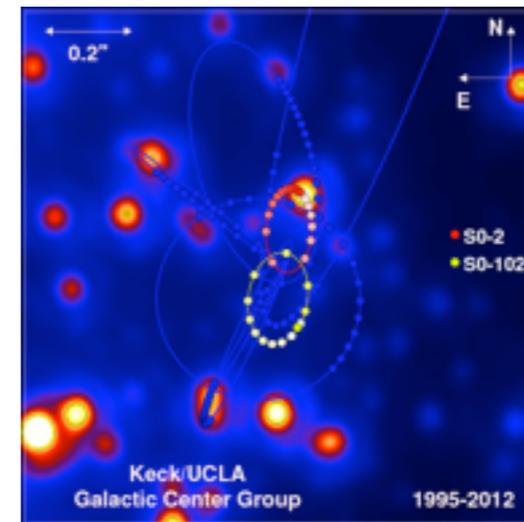
Addirittura può curvare la luce tanto da non farla più uscire:

Buco nero!



[un po' di immaginazione...]

[osservazioni vere! stelle che orbitano
attorno a un punto 'invisibile']



Al centro di ogni galassia
si trova un buco nero di

$$M \sim 10^6 M_{\text{sole}}$$

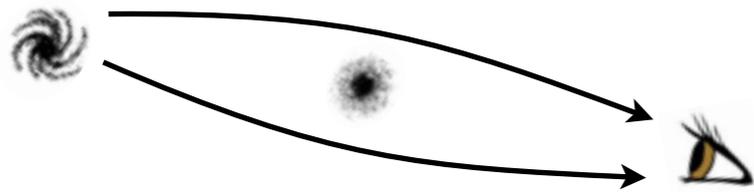
Ma se **perfino la luce curva...** forse non esistono linee dritte!

Forse è colpa **dello spazio**

Ma se **perfino la luce curva...** forse non esistono linee dritte!

Forse è colpa **dello spazio**

Esempio:

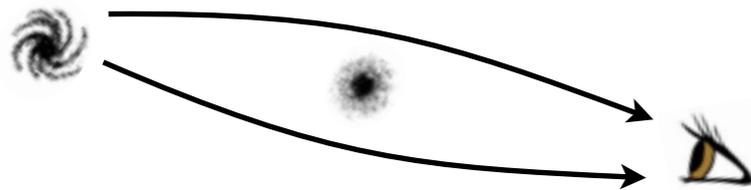


Ma se **perfino la luce curva...** forse non esistono linee dritte!

Forse è colpa **dello spazio**

Esempio:

questa distorsione fa da 'lente'
e può creare effetti ottici spettacolari

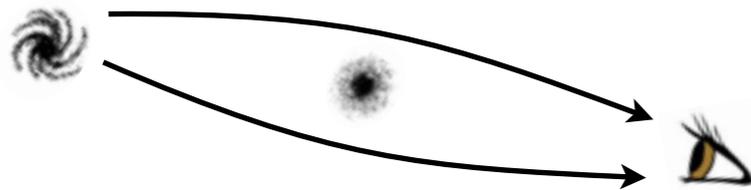


Ma se **perfino la luce curva**... forse non esistono linee dritte!

Forse è colpa **dello spazio**

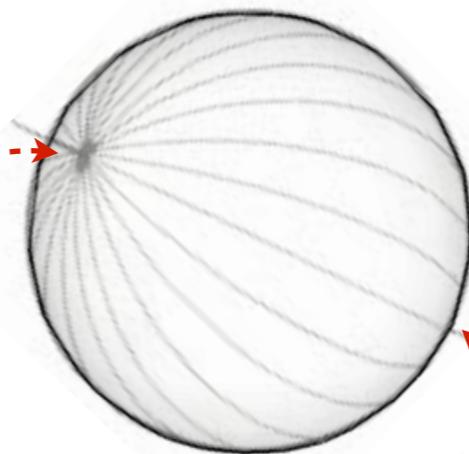
Esempio:

questa distorsione fa da 'lente'
e può creare effetti ottici spettacolari



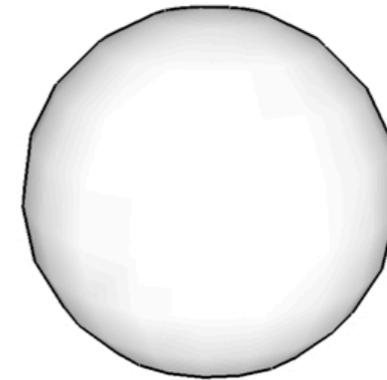
un effetto simile si verifica
sulla superficie di una sfera

raggi che partono
da un polo...



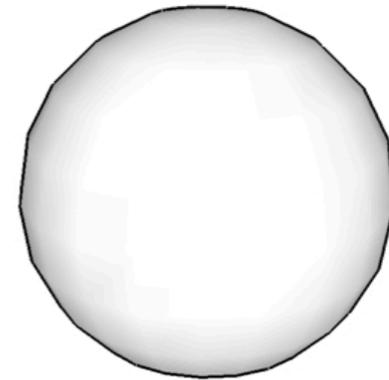
... si reincontrano
all'altro polo

Forse allora lo spazio stesso è curvo,
un po' come la superficie di una sfera



Forse allora lo spazio stesso è curvo,
un po' come la superficie di una sfera

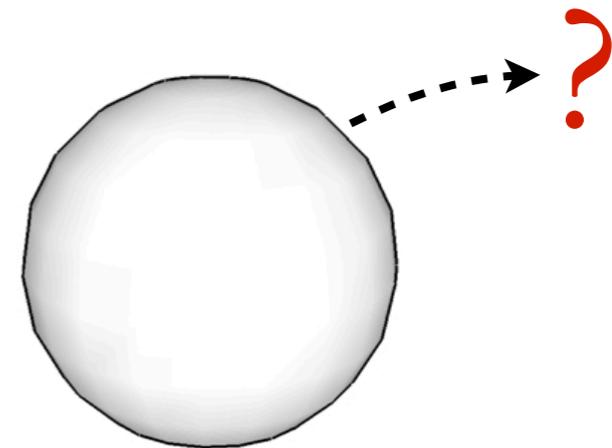
Ma che vuol dire “spazio curvo”?



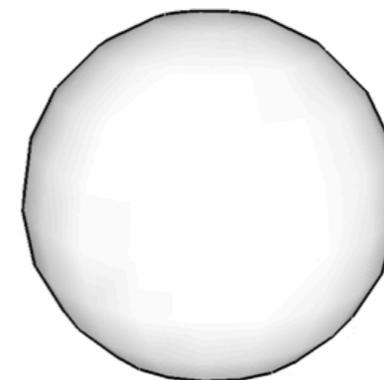
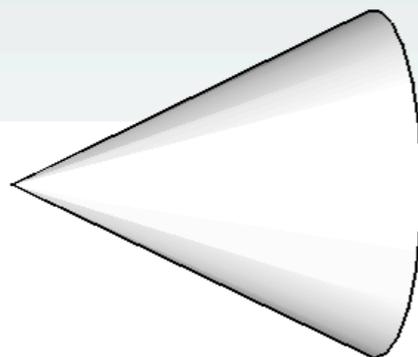
Forse allora lo spazio stesso è curvo,
un po' come la superficie di una sfera

Ma che vuol dire “spazio curvo”?

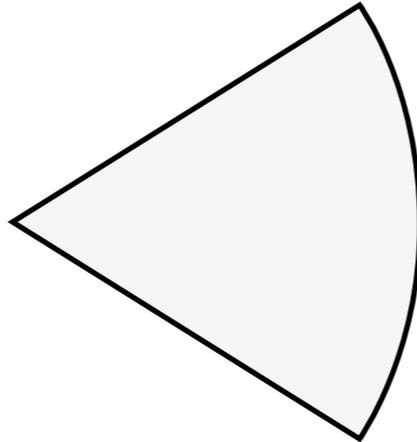
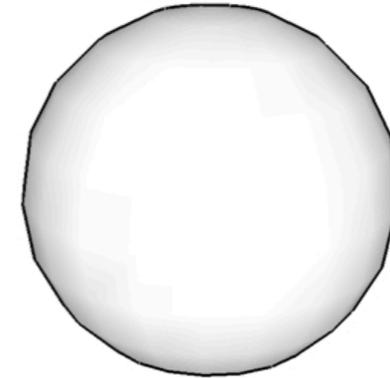
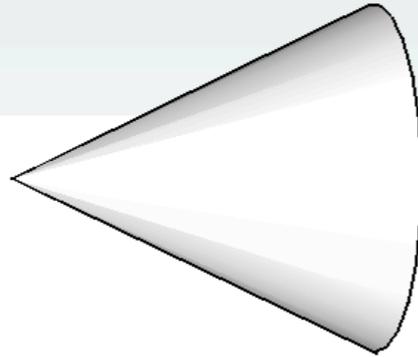
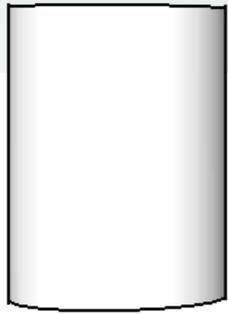
E soprattutto... cosa c'è “fuori”??



Ecco tre spazi che “sembrano curvi”

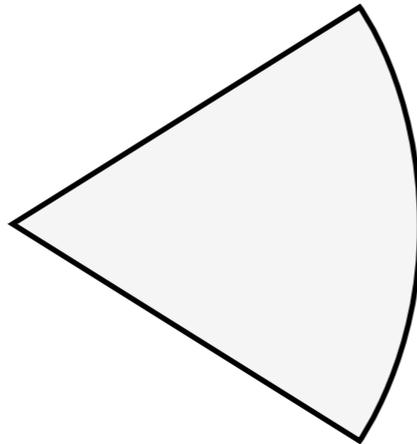
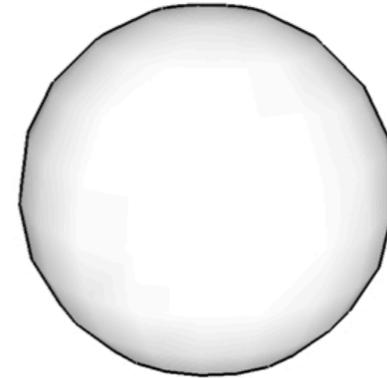
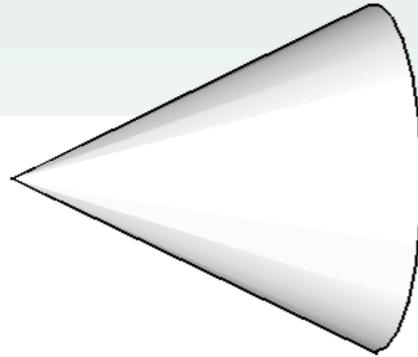


Ecco tre spazi che “sembrano curvi”



ma cono e cilindro si possono appiattare!

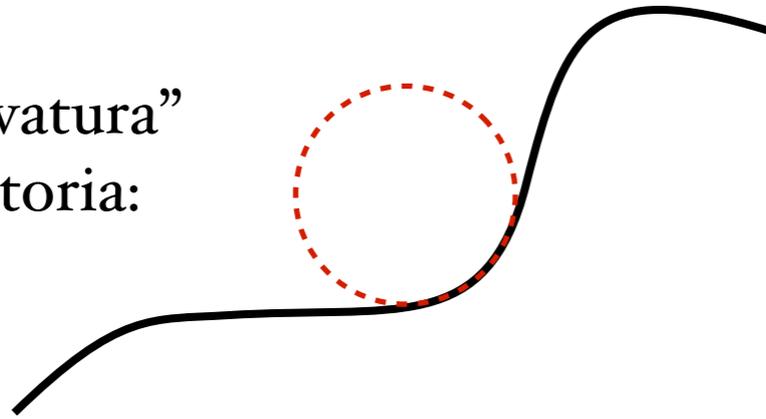
Ecco tre spazi che “sembrano curvi”



ma cono e cilindro si possono appiattare!

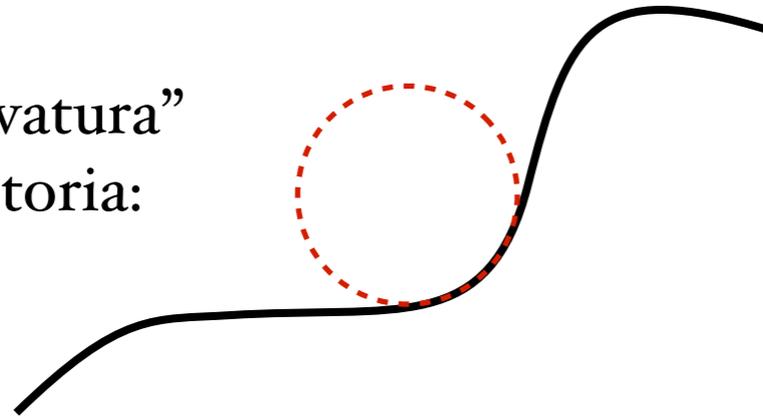
la sfera...
sembrerebbe di no

“raggio di curvatura”
di una traiettoria:



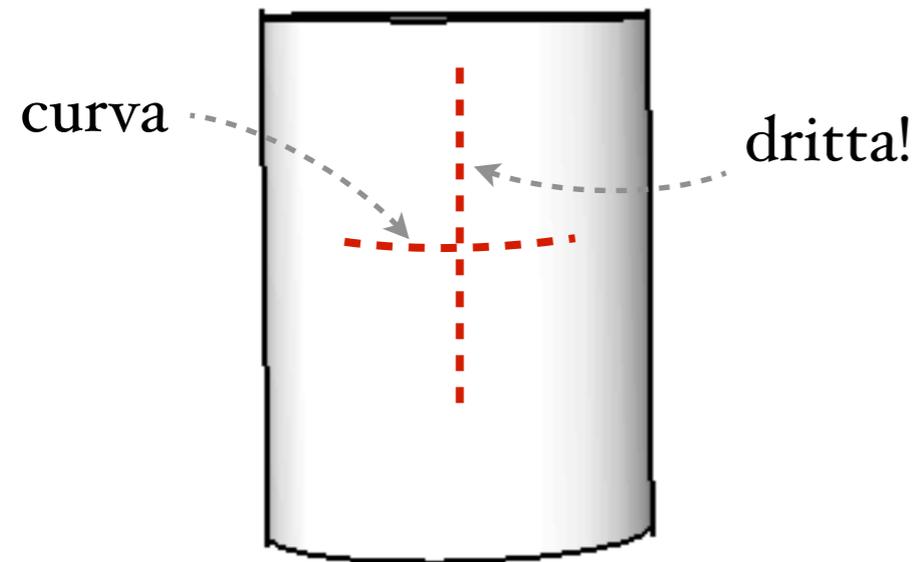
$$\text{'curvatura'} = \frac{1}{\text{raggio di curvatura}}$$

“raggio di curvatura”
di una traiettoria:

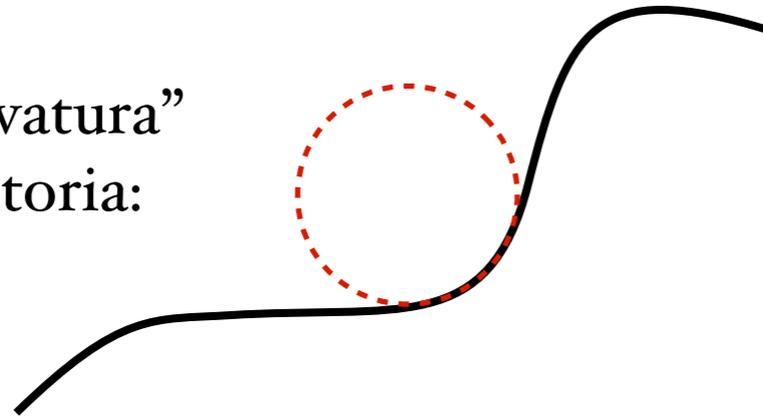


$$\text{'curvatura'} = \frac{1}{\text{raggio di curvatura}}$$

su una superficie, molte possibili traiettorie

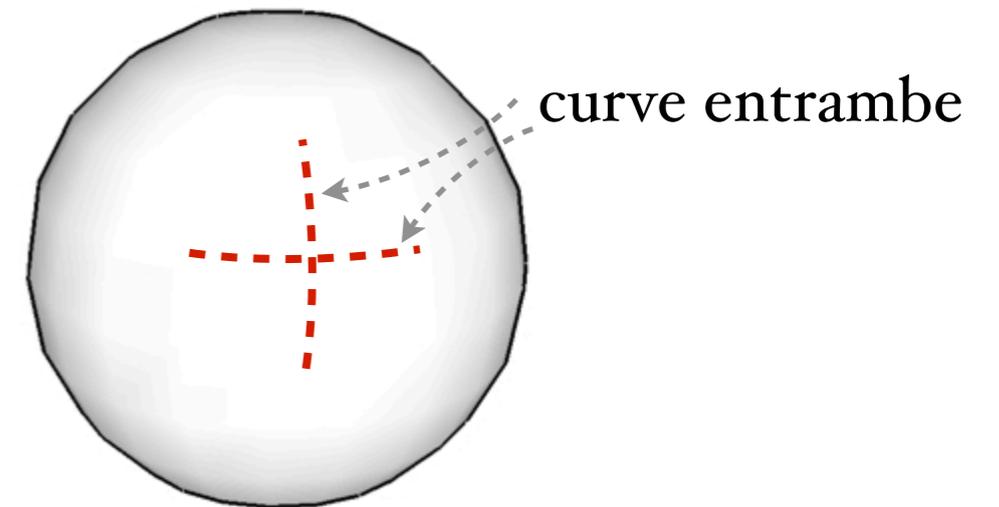
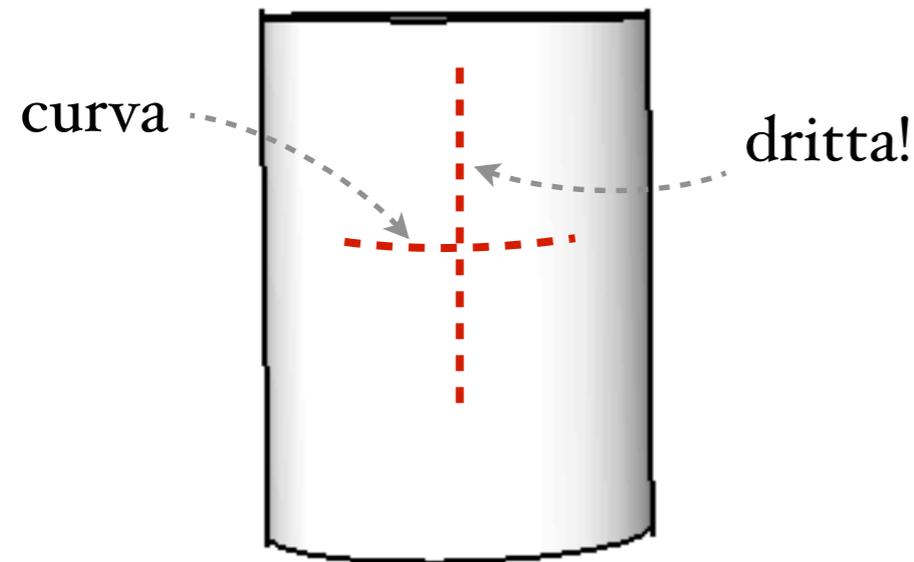


“raggio di curvatura”
di una traiettoria:

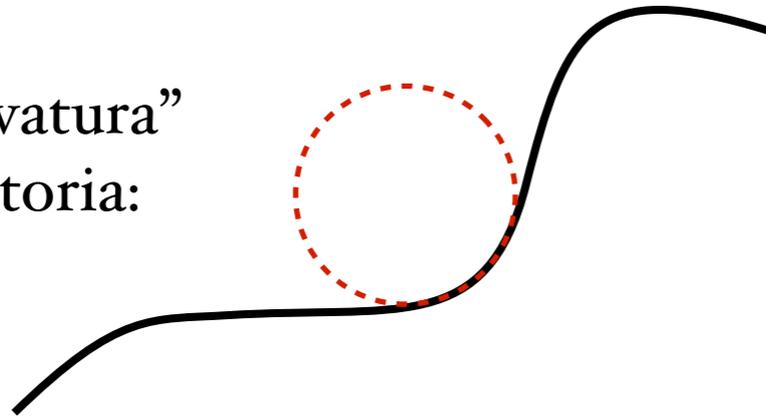


$$\text{'curvatura'} = \frac{1}{\text{raggio di curvatura}}$$

su una superficie, molte possibili traiettorie

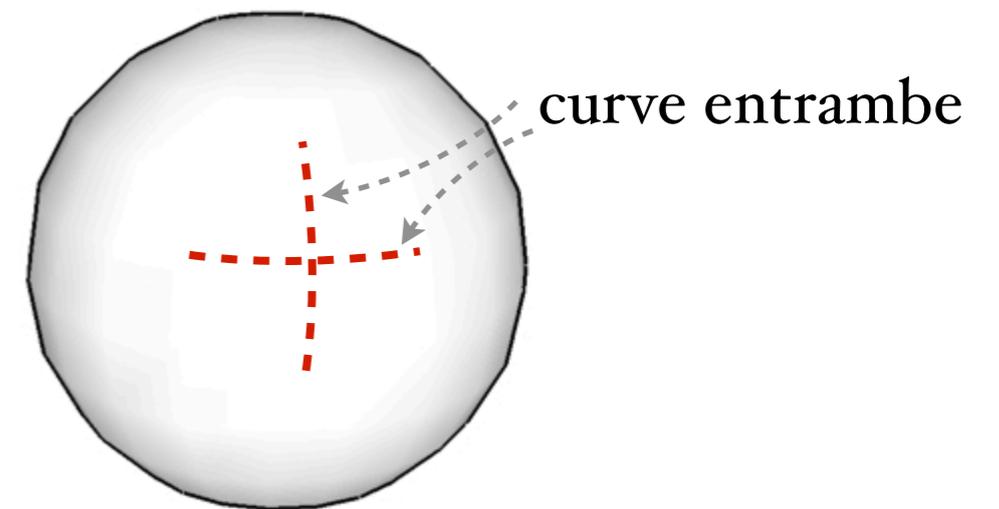
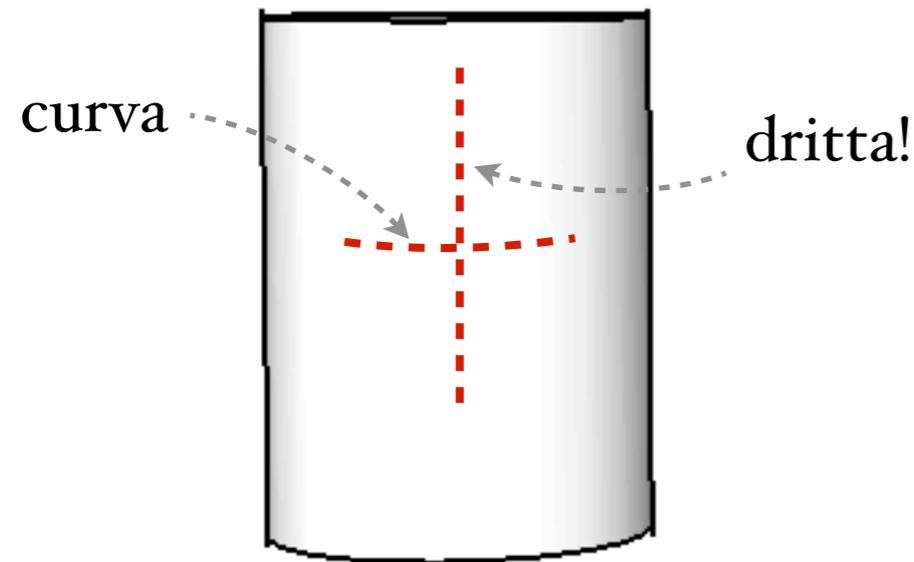


“raggio di curvatura”
di una traiettoria:



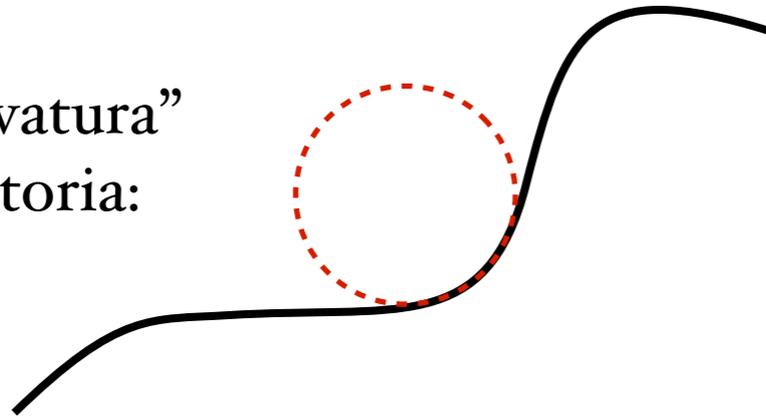
$$\text{'curvatura'} = \frac{1}{\text{raggio di curvatura}}$$

su una superficie, molte possibili traiettorie



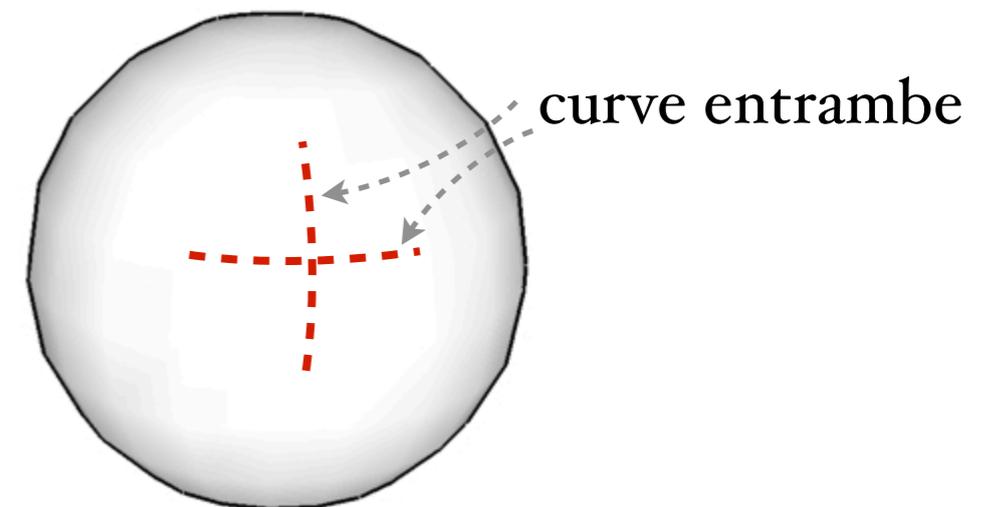
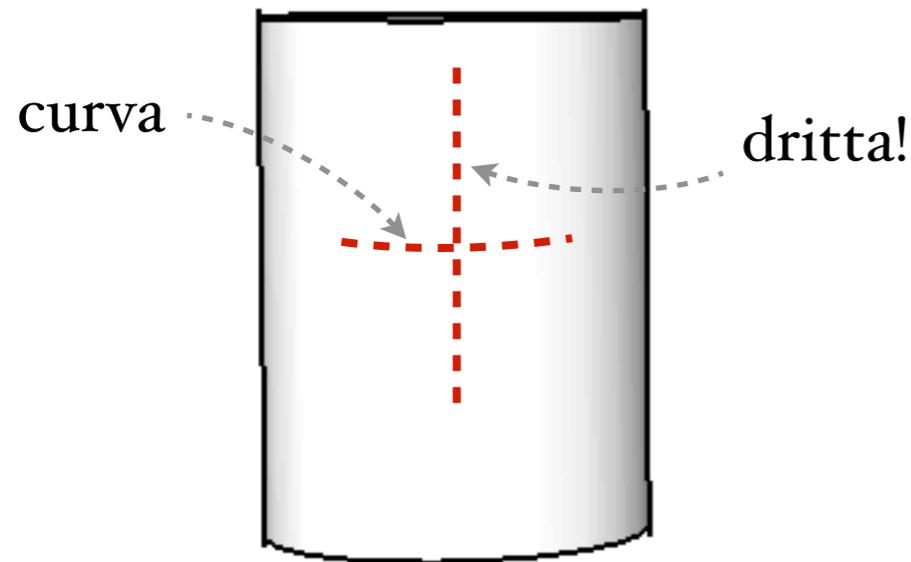
Gauss: bisogna considerare il prodotto della curvatura
massima e minima di curve che passano per un punto

“raggio di curvatura”
di una traiettoria:



$$\text{'curvatura'} = \frac{1}{\text{raggio di curvatura}}$$

su una superficie, molte possibili traiettorie



Gauss: bisogna considerare il prodotto della curvatura
massima e minima di curve che passano per un punto

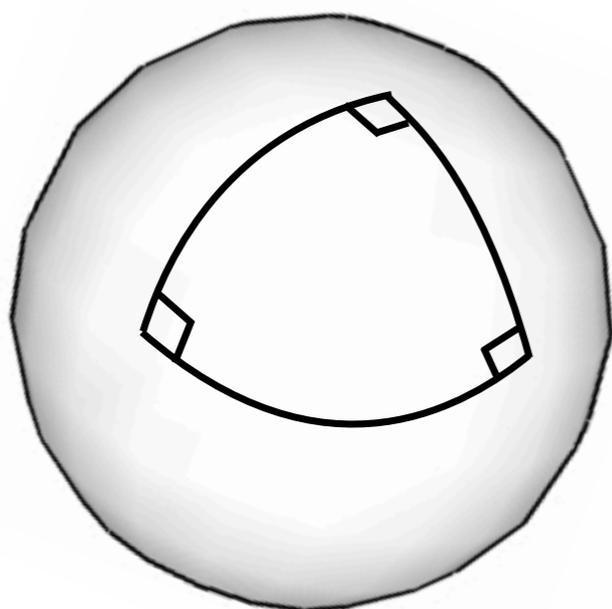
‘Theorema Egregium’ [1825]: questa ‘curvatura gaussiana’ è intrinseca.
Non è necessario invocare un “fuori”!

In altre parole: un essere che vive su una superficie può rendersi conto della sua curvatura senza uscirne.

In altre parole: un essere che vive su una superficie può rendersi conto della sua curvatura senza uscirne.

Per esempio:

- la somma degli angoli di un triangolo è $\neq 180^\circ$!

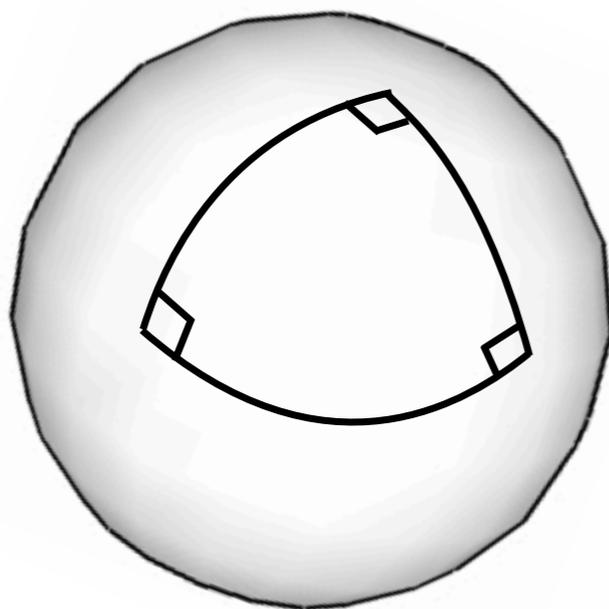


eccone uno con tre angoli retti!

In altre parole: un essere che vive su una superficie può rendersi conto della sua curvatura senza uscirne.

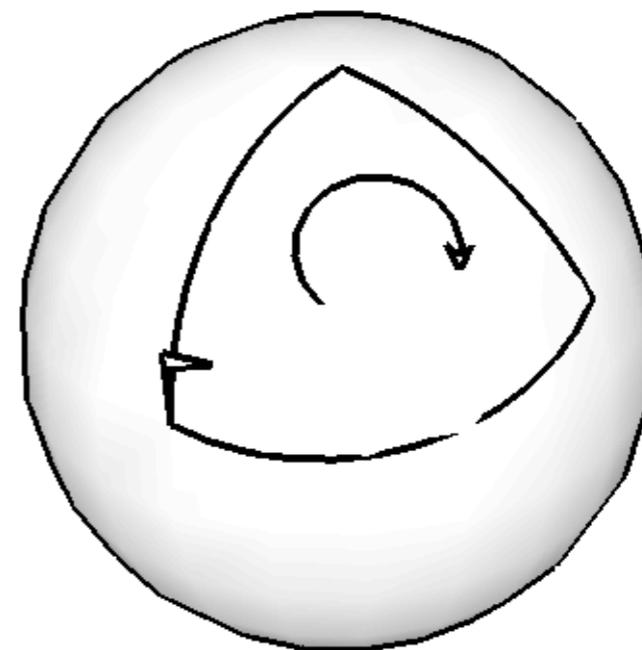
Per esempio:

- la somma degli angoli di un triangolo è $\neq 180^\circ$!



eccone uno con tre angoli retti!

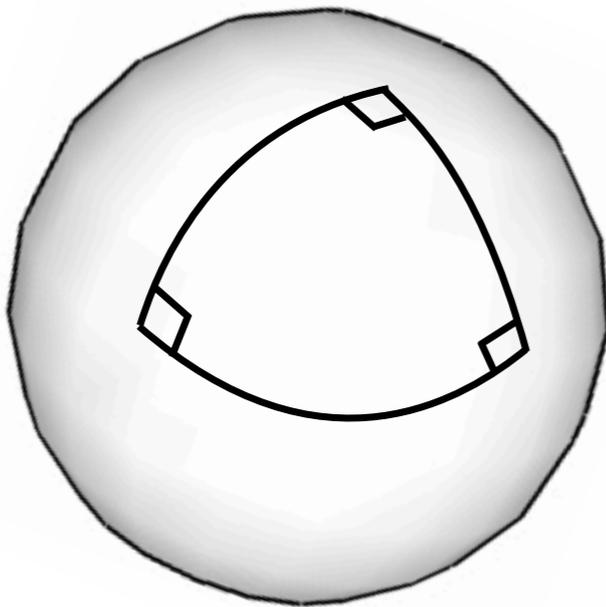
- non si riesce a tenere puntata una bandiera sempre nella stessa direzione...



In altre parole: un essere che vive su una superficie può rendersi conto della sua curvatura senza uscirne.

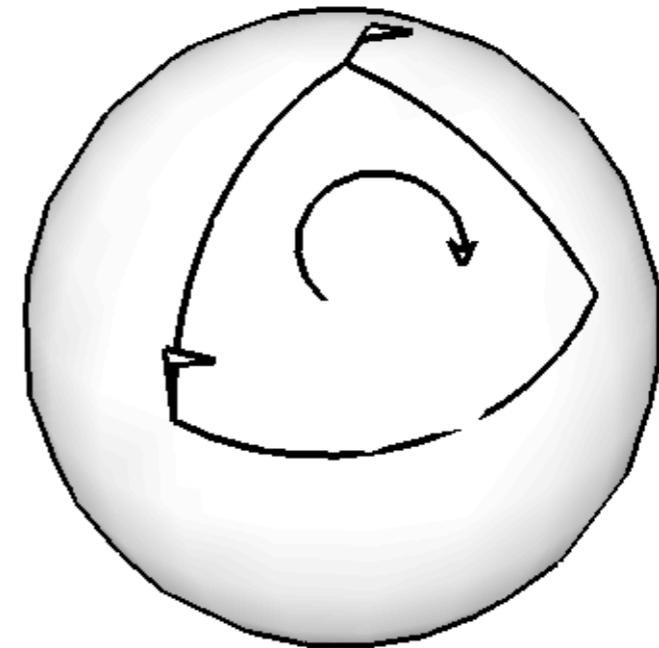
Per esempio:

- la somma degli angoli di un triangolo è $\neq 180^\circ$!



eccone uno con tre angoli retti!

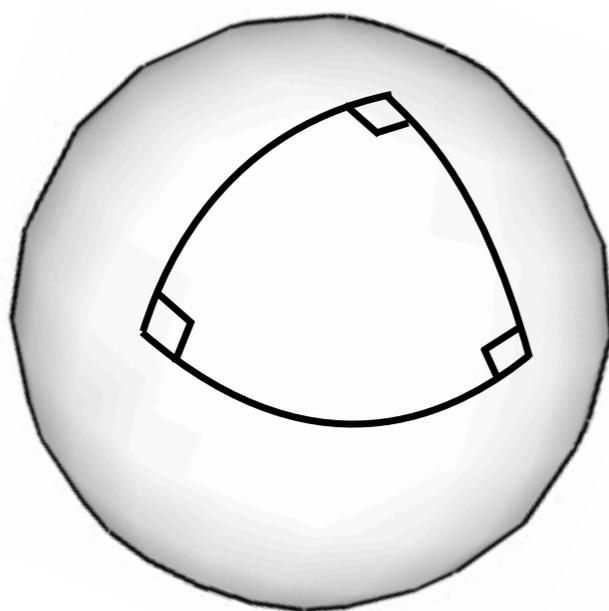
- non si riesce a tenere puntata una bandiera sempre nella stessa direzione...



In altre parole: un essere che vive su una superficie può rendersi conto della sua curvatura senza uscirne.

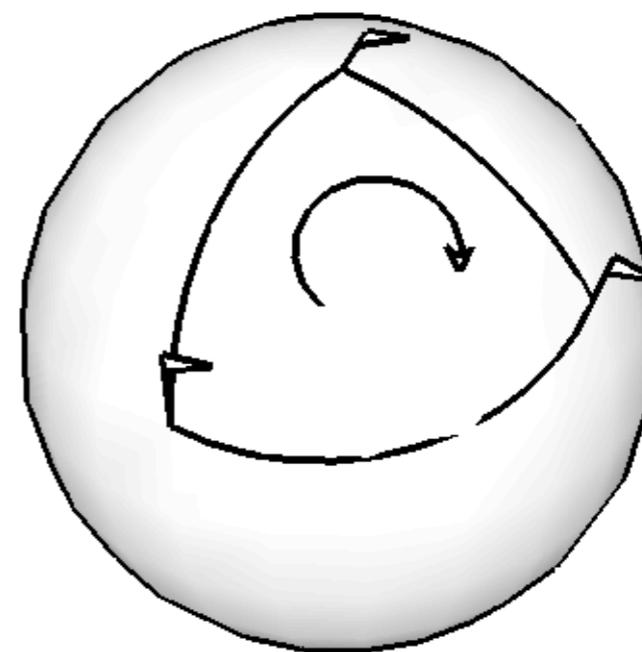
Per esempio:

- la somma degli angoli di un triangolo è $\neq 180^\circ$!



eccone uno con tre angoli retti!

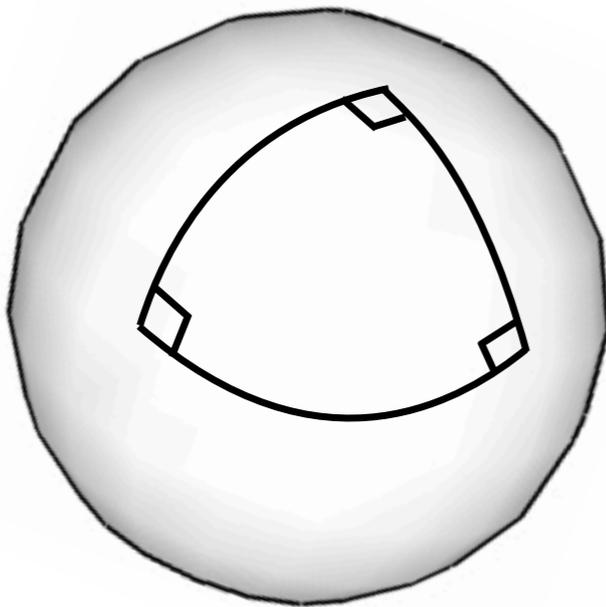
- non si riesce a tenere puntata una bandiera sempre nella stessa direzione...



In altre parole: un essere che vive su una superficie può rendersi conto della sua curvatura senza uscirne.

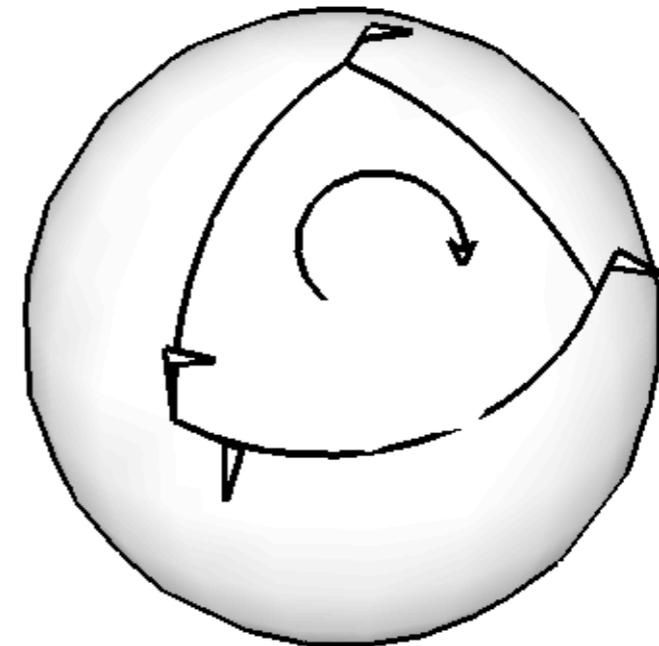
Per esempio:

- la somma degli angoli di un triangolo è $\neq 180^\circ$!



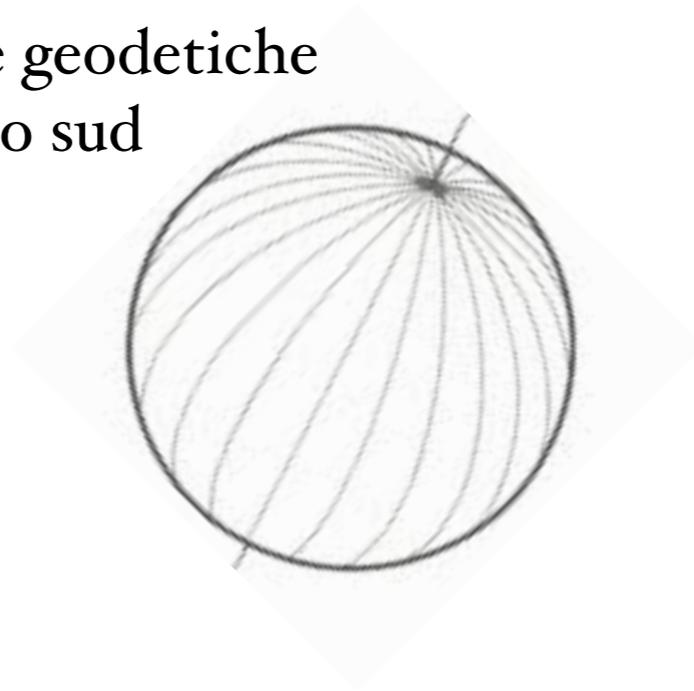
eccone uno con tre angoli retti!

- non si riesce a tenere puntata una bandiera sempre nella stessa direzione...



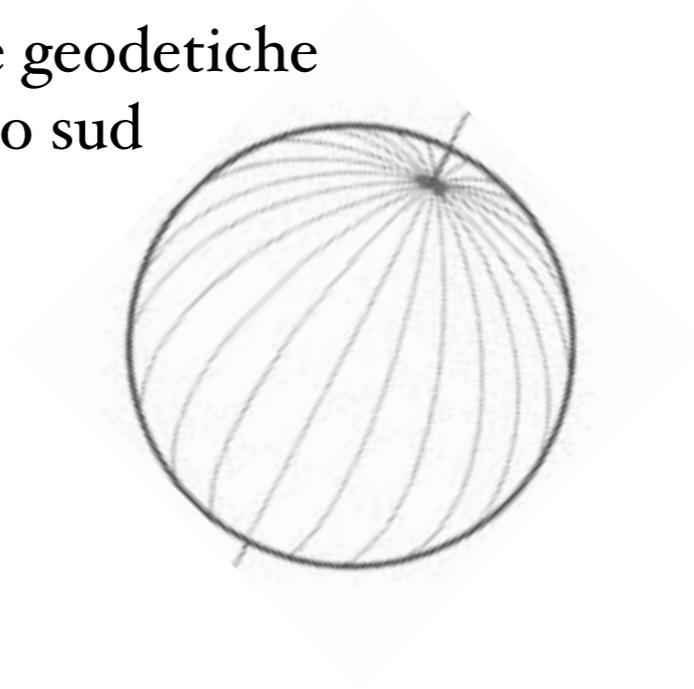
La luce “cerca di andare dritta”: segue il cammino
che minimizza la distanza [“geodetica”]

per es. i meridiani sono le geodetiche
tra polo nord o polo sud



La luce “cerca di andare dritta”: segue il cammino
che minimizza la distanza [“geodetica”]

per es. i meridiani sono le geodetiche
tra polo nord o polo sud

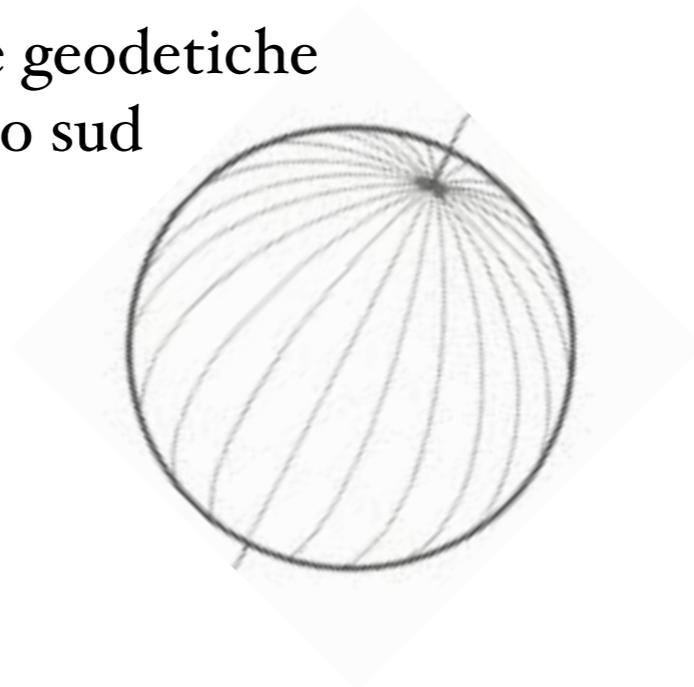


o le rotte degli aerei.



La luce “cerca di andare dritta”: segue il cammino che minimizza la distanza [“geodetica”]

per es. i meridiani sono le geodetiche tra polo nord o polo sud

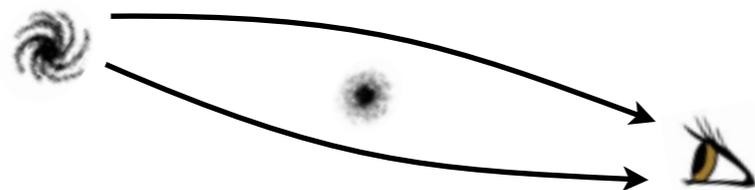


o le rotte degli aerei.

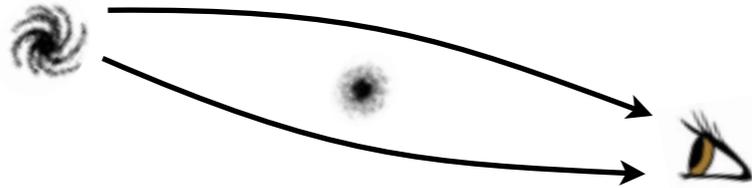


notate come sembrano ‘curve’ sulla mappa nonostante siano ‘le più dritte’ possibili

In un senso simile, i cammini 'distorti' della luce
sono in realtà geodetiche



In un senso simile, i cammini 'distorti' della luce
sono in realtà geodetiche

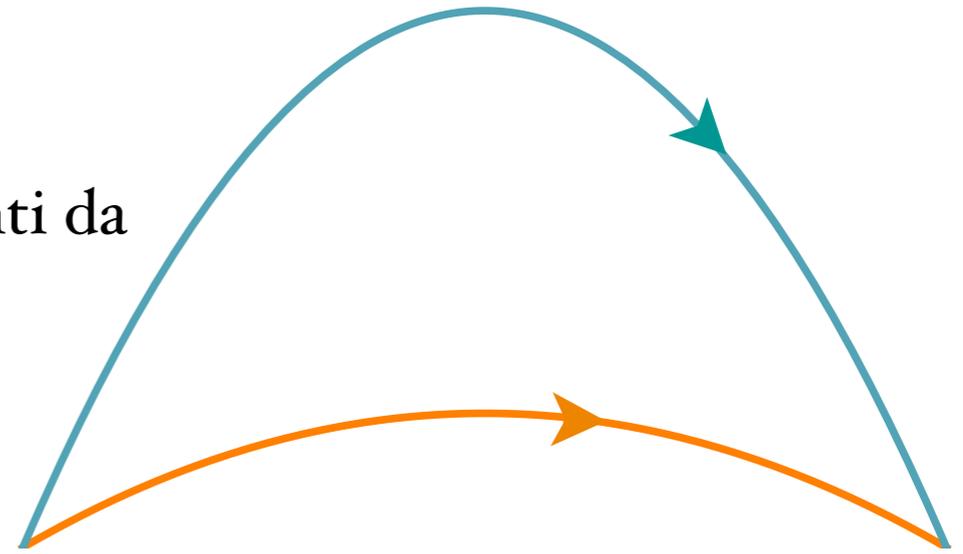


La luce curva perché **lo spazio stesso** è curvo.

nel senso "intrinseco" di Gauss

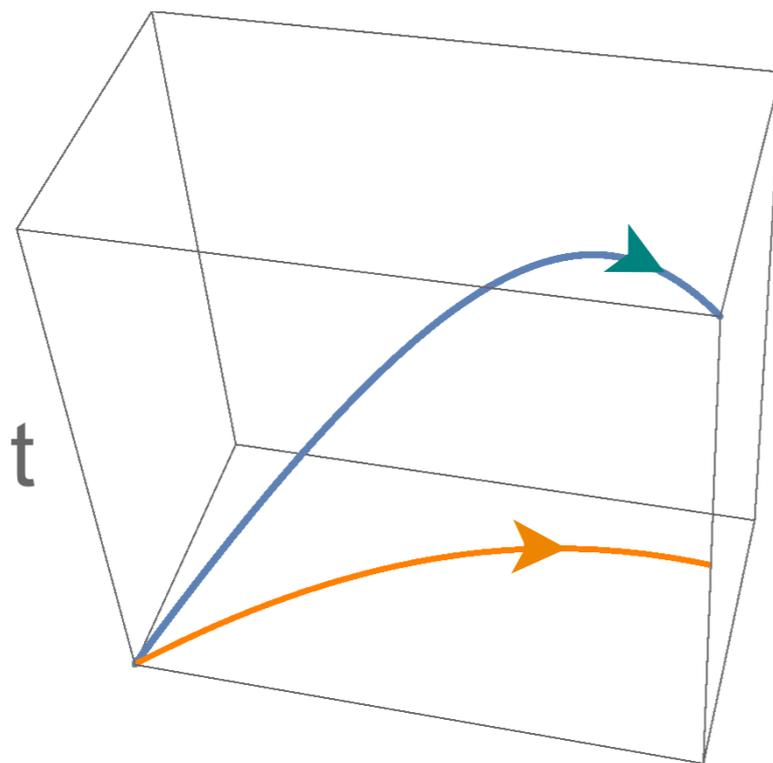
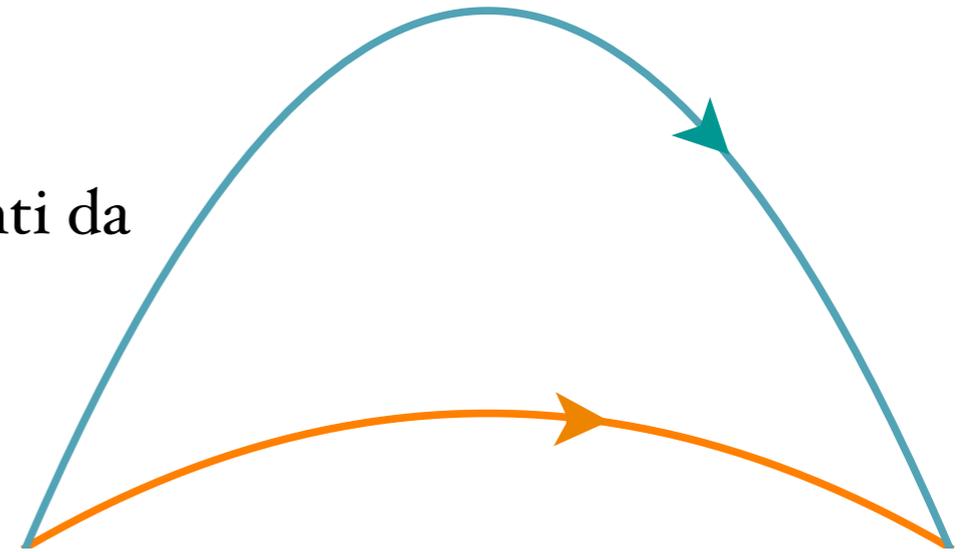
E gli oggetti dotati di massa?

due punti possono essere congiunti da
traiettorie molto diverse...



E gli oggetti dotati di massa?

due punti possono essere congiunti da
traiettorie molto diverse...

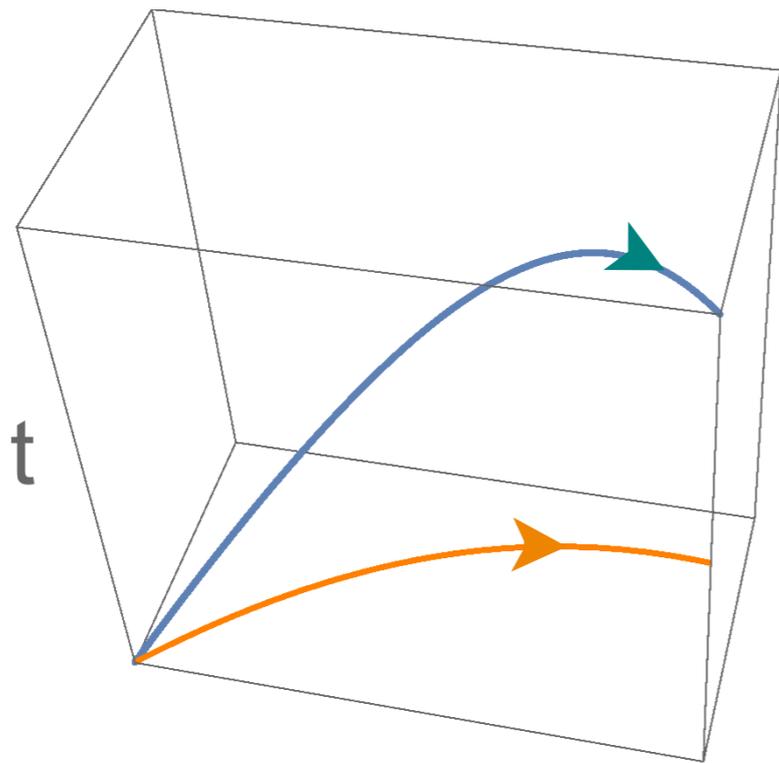


...ma se al grafico aggiungiamo
il **tempo** le cose cambiano:

entrambe le traiettorie
sono 'minime' nello **spaziotempo**
[massimizzano il tempo]

[già in relatività ristretta spazio e tempo sono 'mischiat'.]

ancora una volta, le traiettorie sembrano curve nonostante siano le traiettorie 'più dritte'



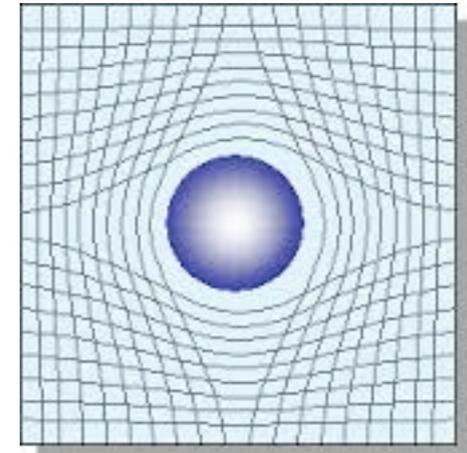
Non esiste realmente la “forza di gravità”.

Gli oggetti seguono geodetiche, ma ‘curvano’
perché lo spaziotempo è curvo.

Ultimo passaggio: nella teoria di Newton la massa generava
la “forza di gravità”. Nella nuova visione:

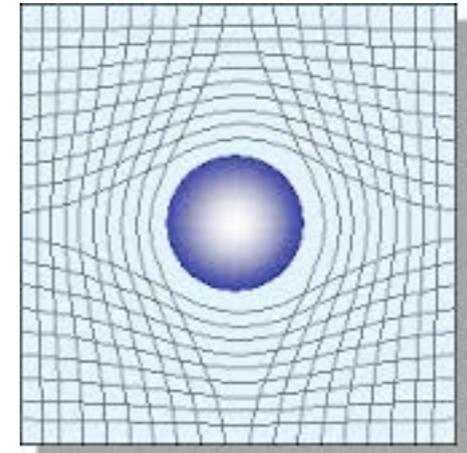
Ultimo passaggio: nella teoria di Newton la massa generava la “forza di gravità”. Nella nuova visione:

La massa curva lo spazio.



Ultimo passaggio: nella teoria di Newton la massa generava la “forza di gravità”. Nella nuova visione:

La massa curva lo spazio.



Su ‘larga scala’, **solo una** possibile equazione **matematicamente coerente**

Equazione
di Einstein [1915]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

curvatura

‘costante cosmologica’:
accelerazione dell’Universo!

costante di Newton

massa/energia

In certe situazioni, ci si aspetta che siano rilevanti sia
la gravità che la meccanica quantistica.

per es.: Buchi neri microscopici

In certe situazioni, ci si aspetta che siano rilevanti sia la gravità che la meccanica quantistica.

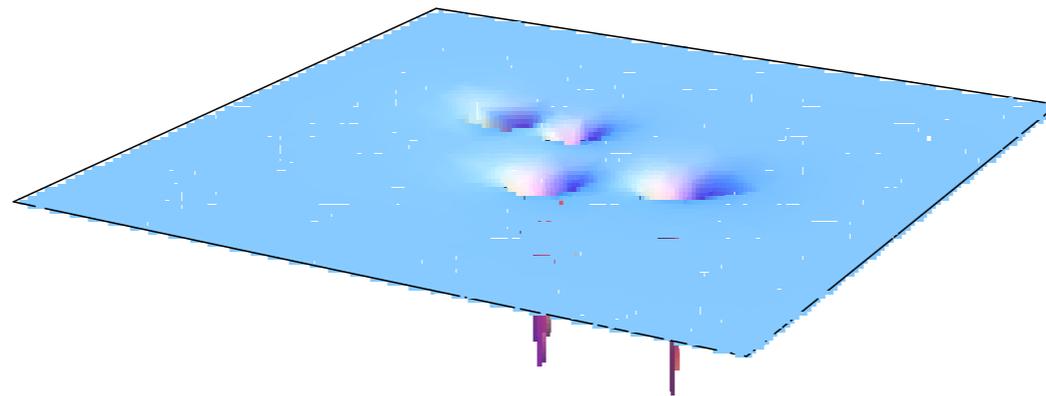
per es.: Buchi neri microscopici

- È probabile che l'equazione venga **modificata** da termini **nonlineari** nella **curvatura** $R^2, R^3 \dots$

In certe situazioni, ci si aspetta che siano rilevanti sia la gravità che la meccanica quantistica.

per es.: Buchi neri microscopici

- È probabile che l'equazione venga **modificata** da termini **nonlineari** nella **curvatura** $R^2, R^3 \dots$
- Così come la forza elettrica è trasportata in quanti ("fotoni")  ci si aspetta che la gravità sia trasportata in quanti di curvatura ("gravitoni")



In conclusione

La materia dice allo spazio come curvarsi;
lo spazio dice alla materia come muoversi