



ART&SCIENCE ACROSS ITALY

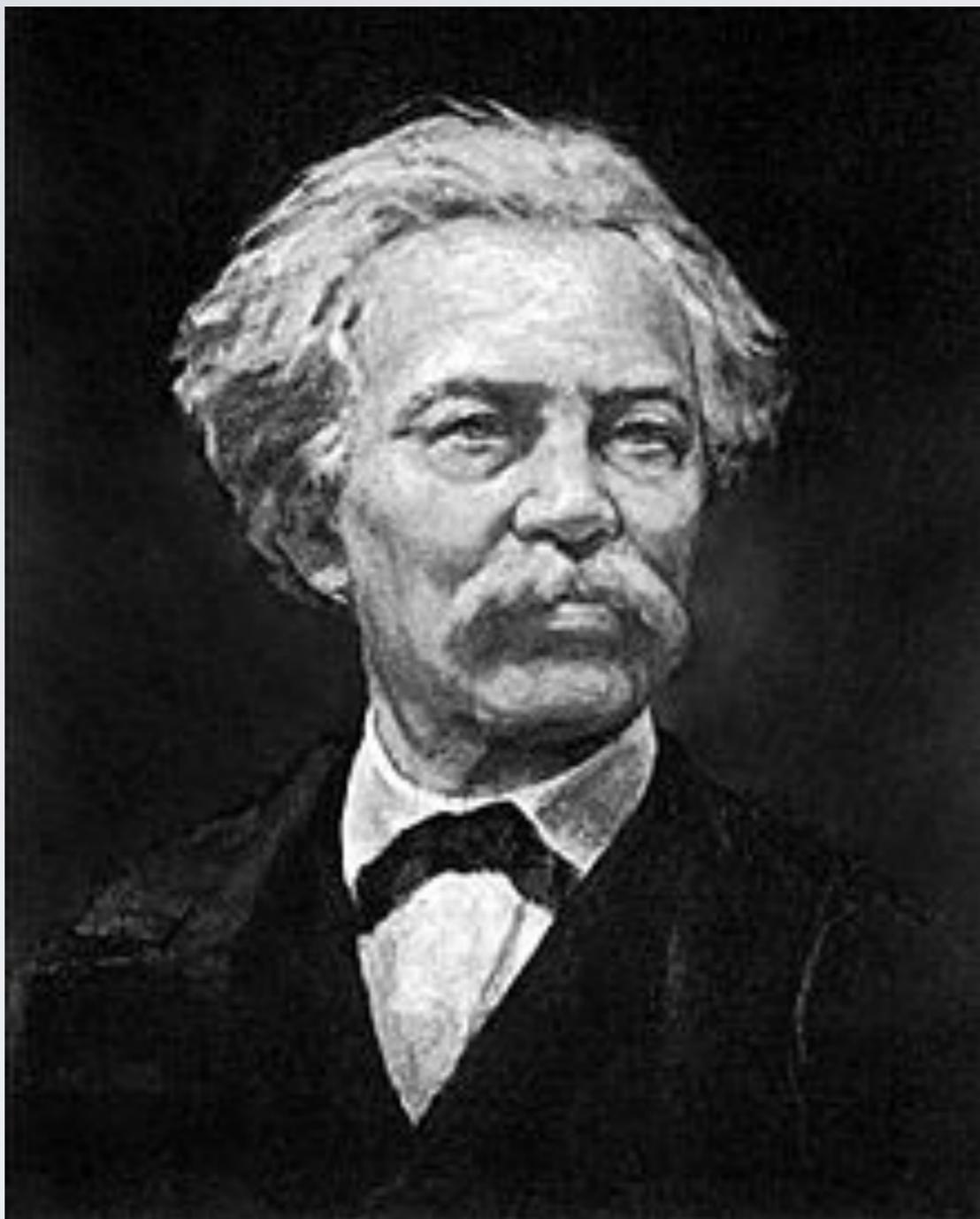
LA FISICA DEL TEMPO

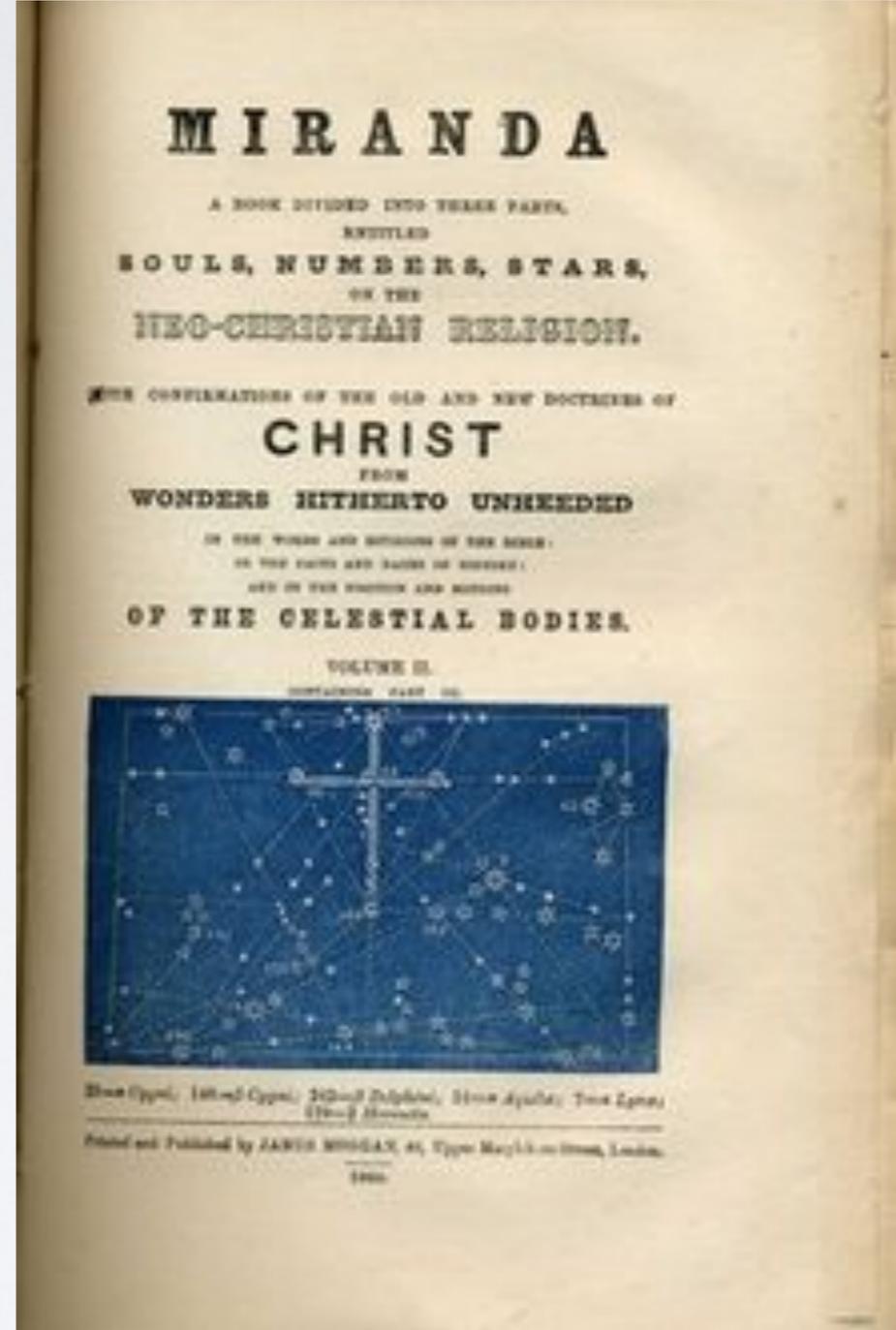
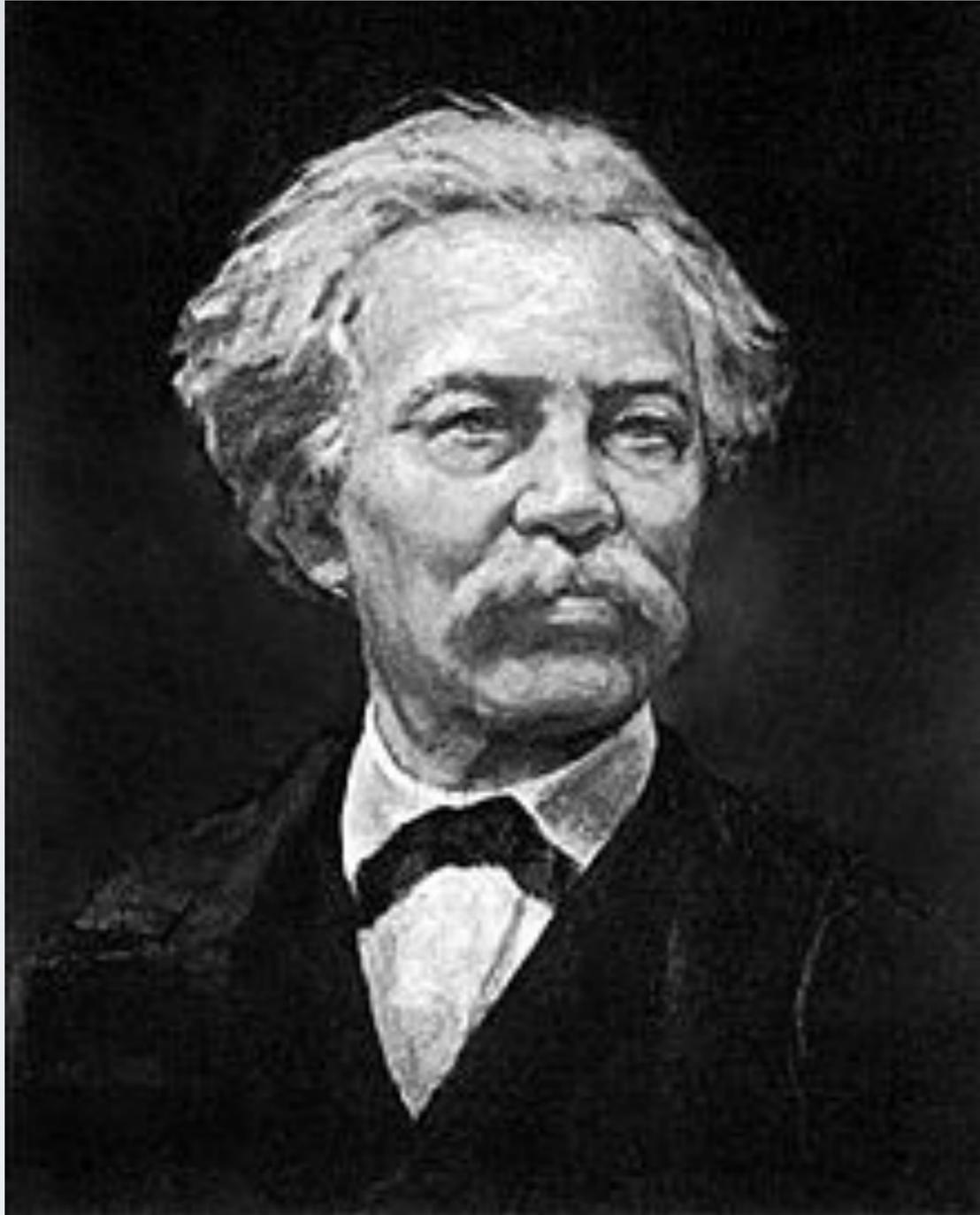
Prof. Giovanni Organtini

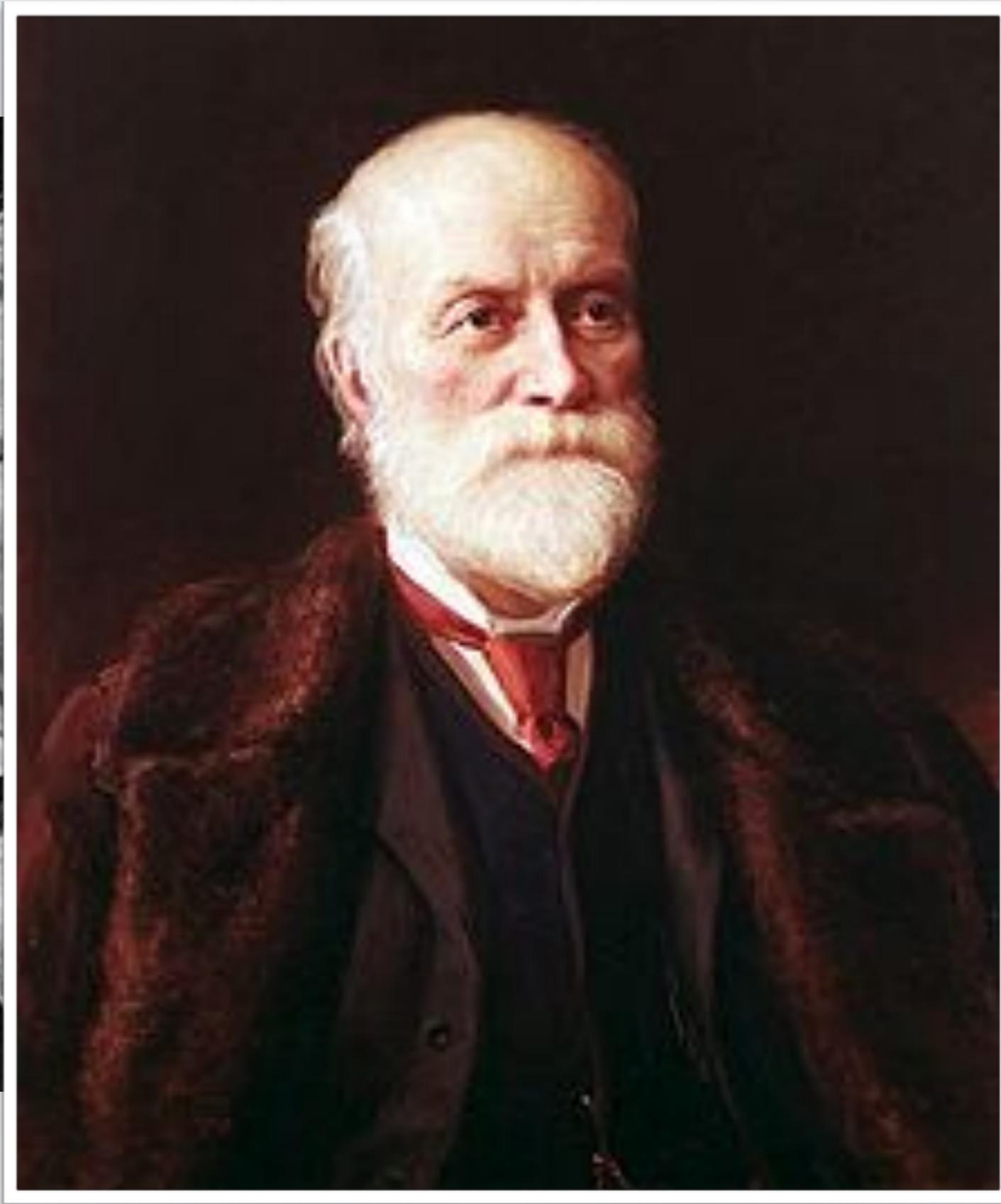
Dip. di Fisica - "Sapienza", Università di Roma



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA







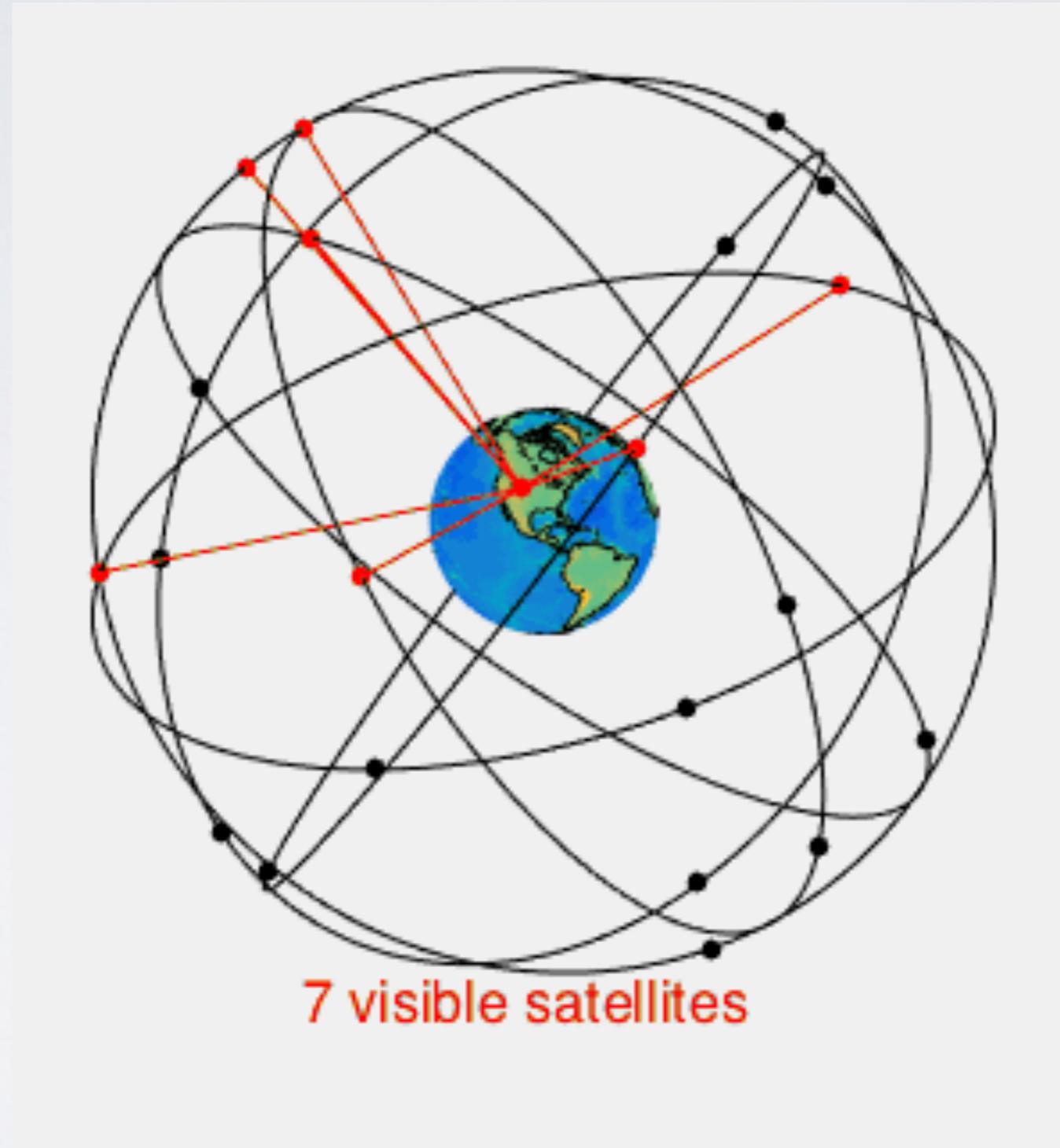


I navigatori satellitari *misurano* la propria posizione sul globo terrestre e la riportano su una *mappa* caricata in memoria.

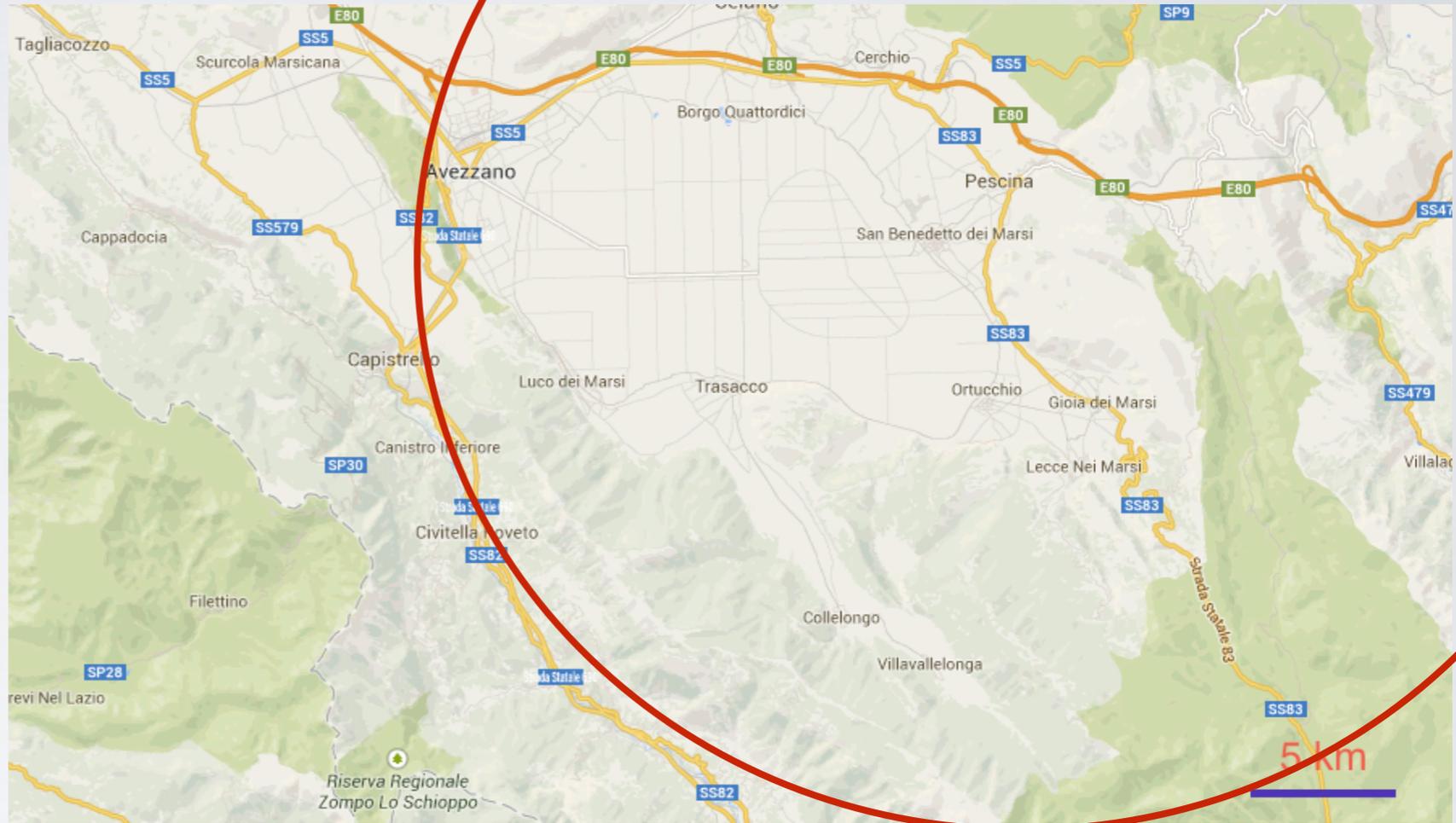
Per farlo usano i segnali inviati a Terra da circa 30 satelliti in orbita a 20,200 km di quota.

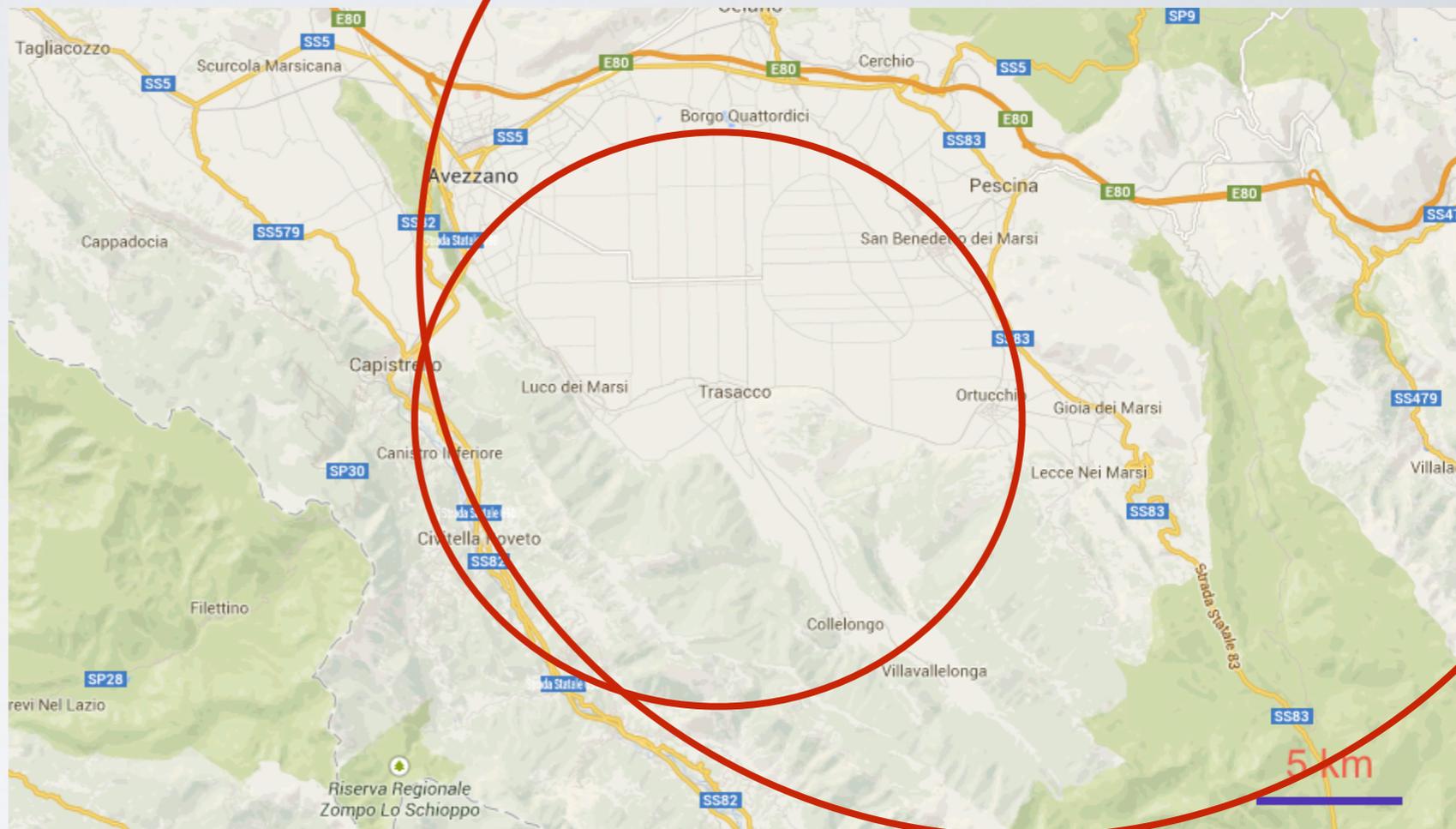


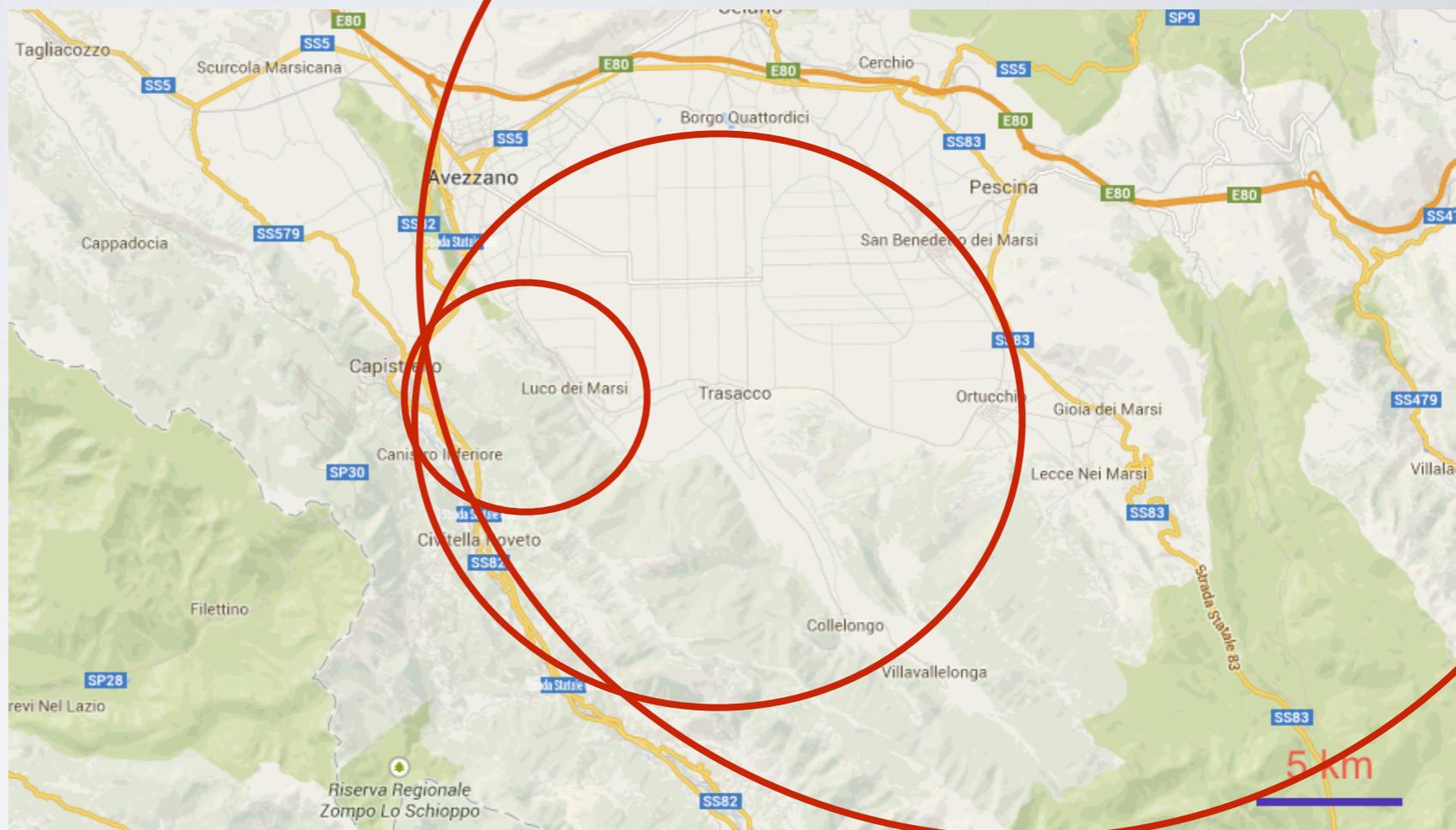
IL SISTEMA GPS



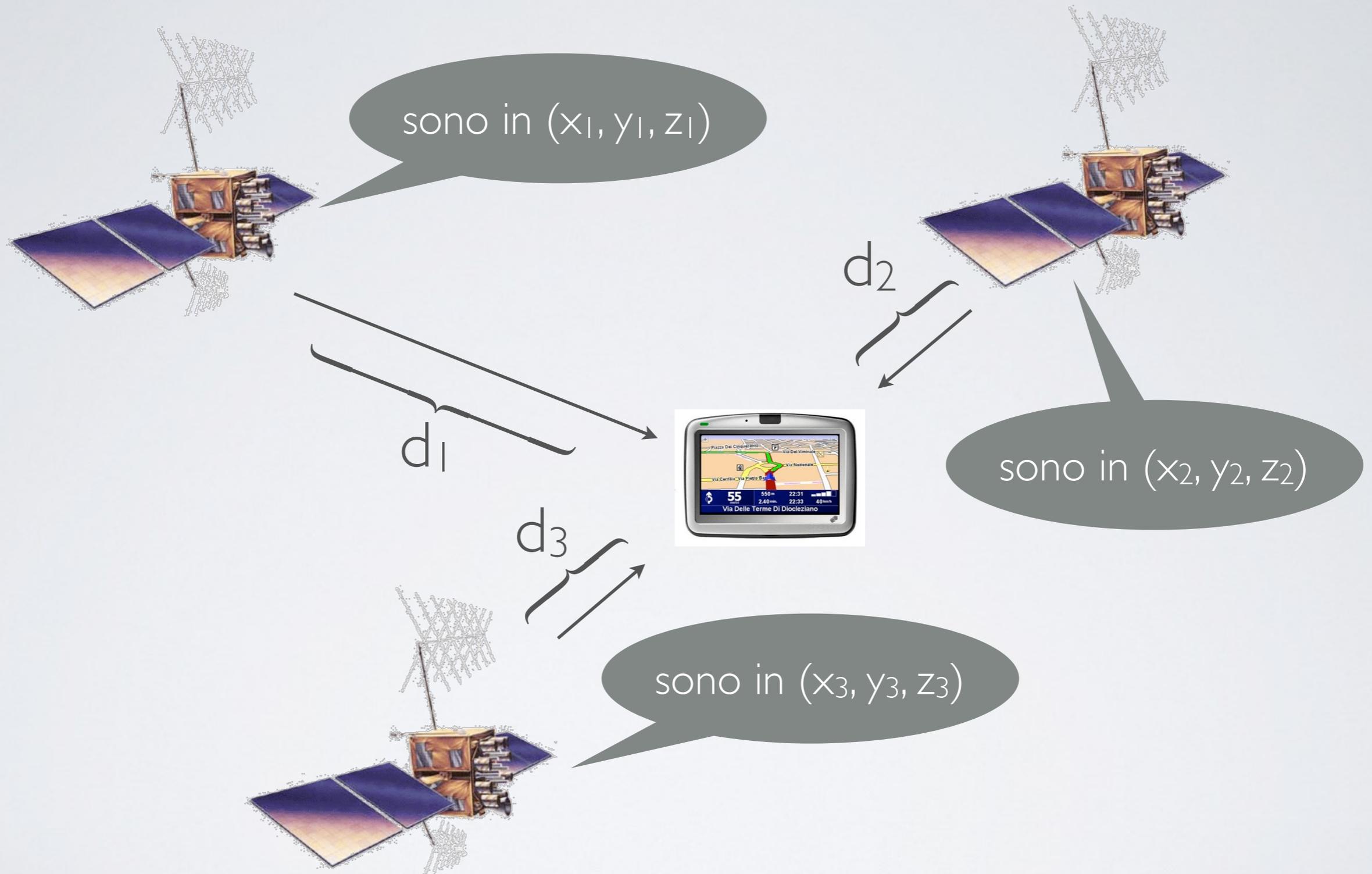








COME FUNZIONA?



LA MISURA DELLE DISTANZE

- Come in Formula 1, le distanze si misurano in *secondi*
- Basta conoscere la velocità:
 $s=vt$, $v=300,000 \text{ km/s}$



tempo	distanza
1 s	300,000 km
1 ms = 10^{-3} s	300 km
1 μ s = 10^{-6} s	300 m

LA MISURA DELLE DISTANZE



nuovo messaggio
spedito alle 14:35:02.03

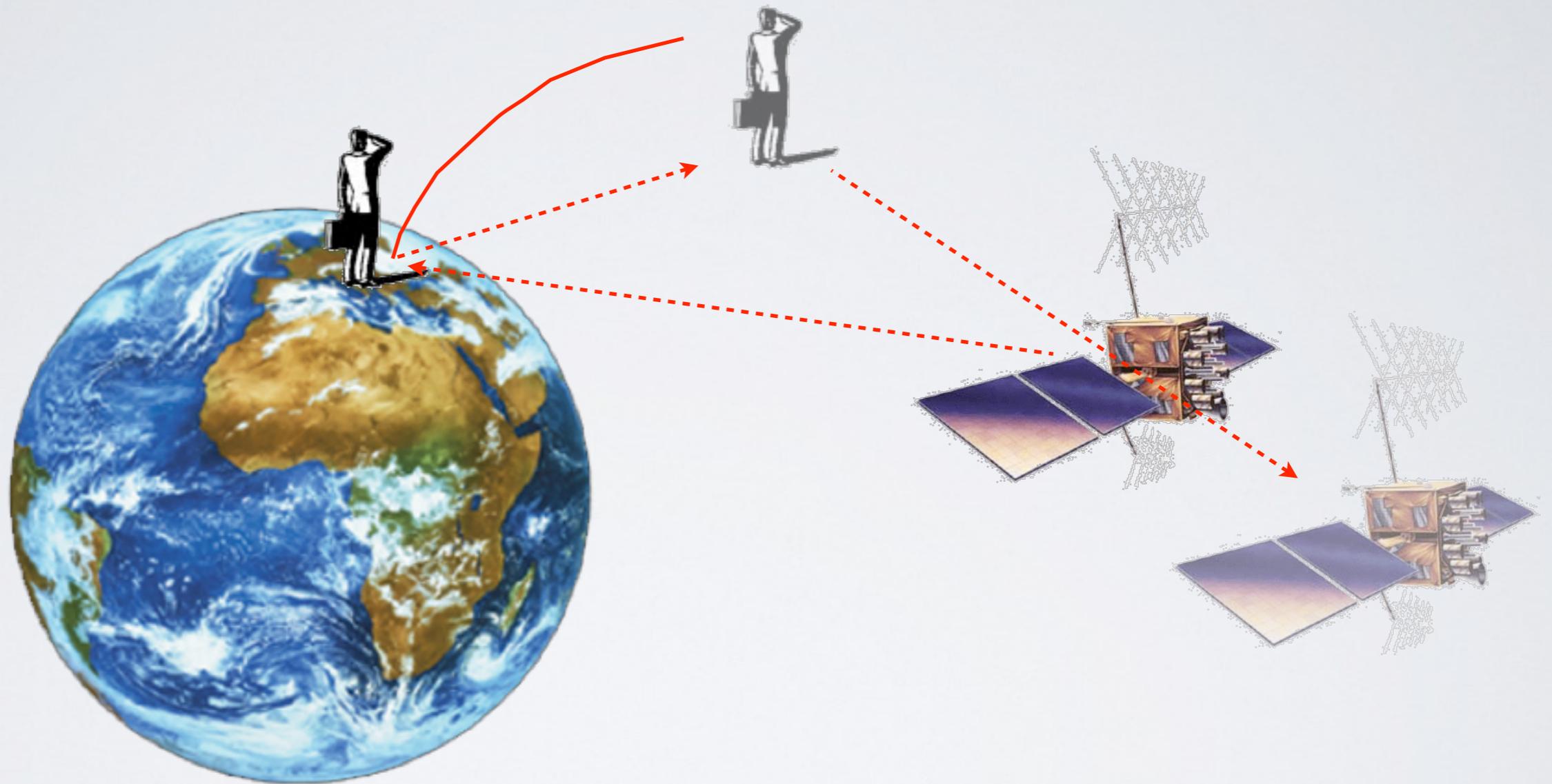


Ora sono le 14:35:02.13. Il
messaggio risale a 10 centesimi
di secondo fa, quindi viene da
 $300,000 \times 10/100 = 3,000$ km

LA PRECISIONE DEGLI OROLOGI



IL QUARTO SATELLITE



IN FORMULE

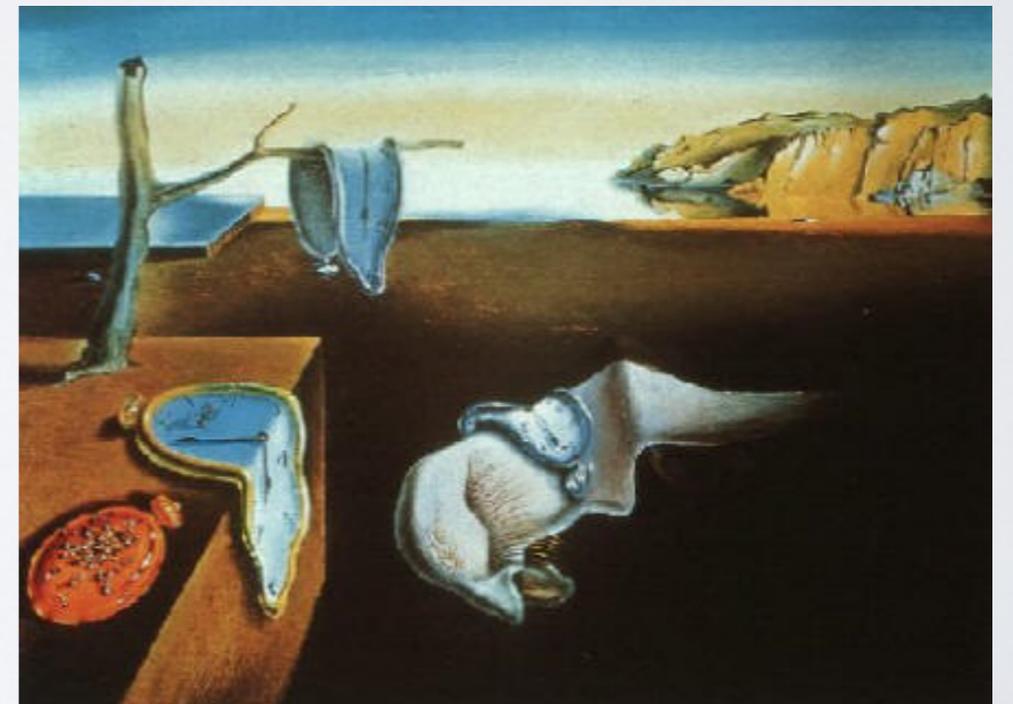
$$\left\{ \begin{array}{l} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = c^2 (t_1 - t)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = c^2 (t_2 - t)^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = c^2 (t_3 - t)^2 \end{array} \right.$$

IN FORMULE

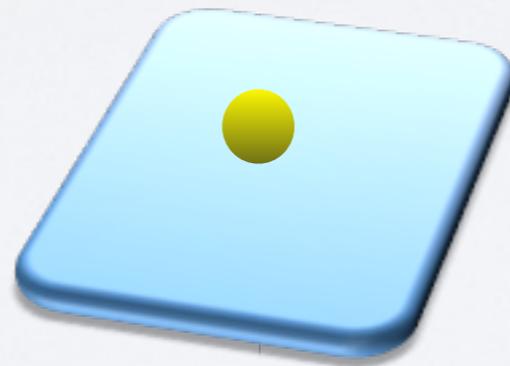
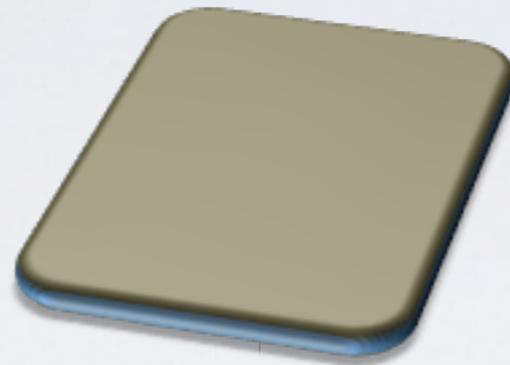
$$\left\{ \begin{array}{l} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = c^2 (t_1 - t + \delta t)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = c^2 (t_2 - t + \delta t)^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = c^2 (t_3 - t + \delta t)^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = c^2 (t_4 - t + \delta t)^2 \end{array} \right.$$

LA RELATIVITÀ

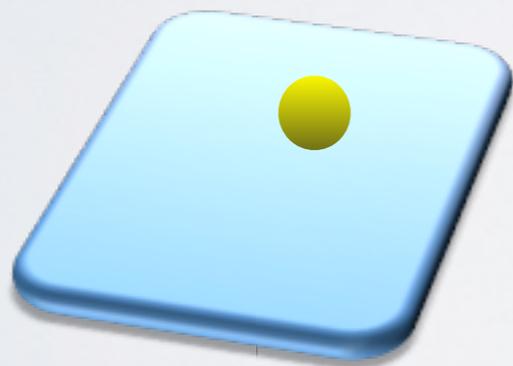
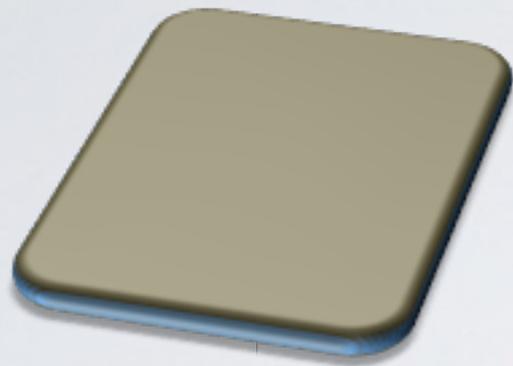
- In fisica classica le velocità si sommano vettorialmente
- In fisica relativistica no:
 - la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento (!)
 - la luce si muove sempre alla stessa velocità, anche se la osservo da un treno superveloce!!!
 - le leggi della fisica hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento



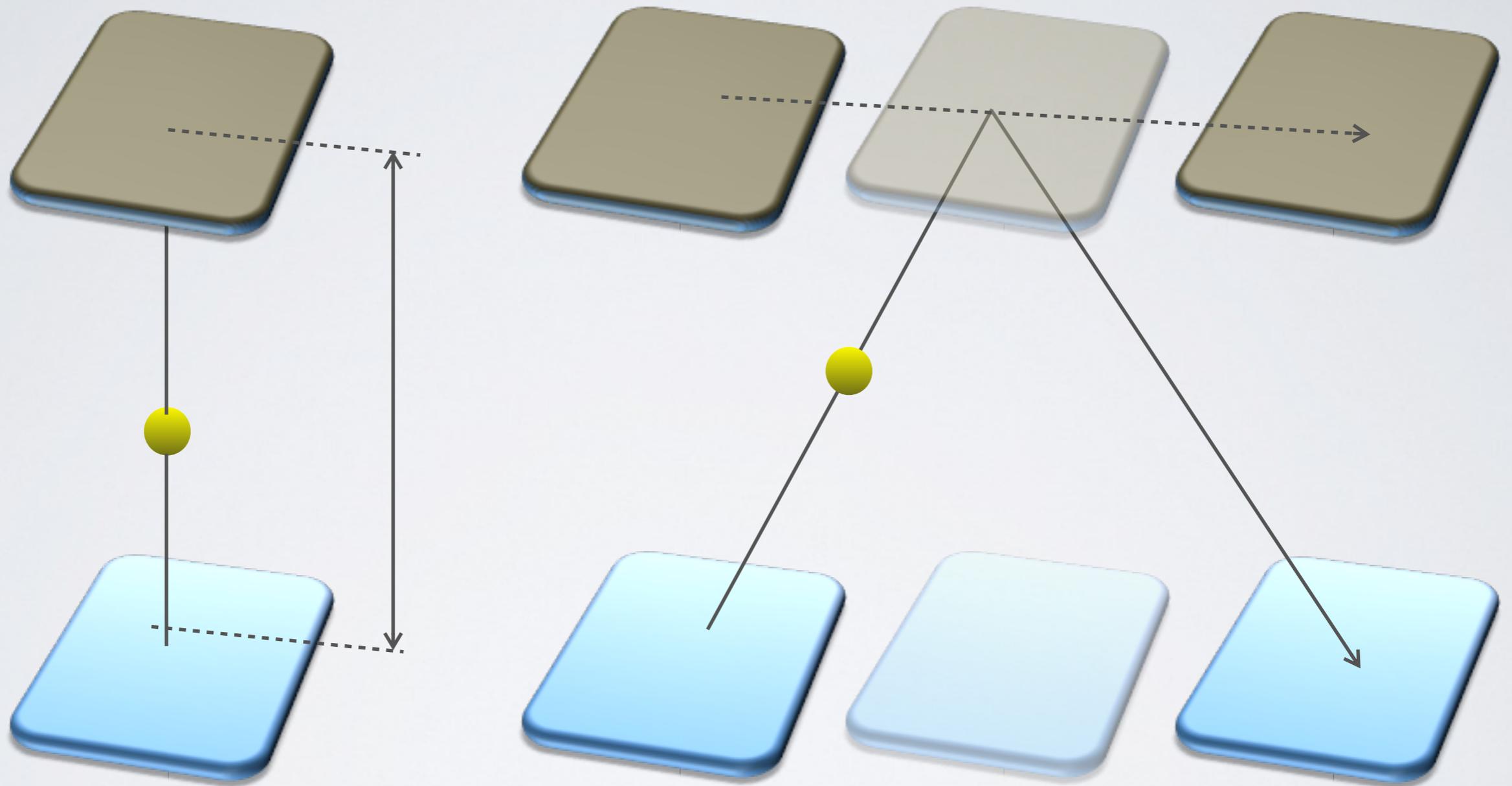
L'OROLOGIO A LUCE



L'OROLOGIO A LUCE



L'OROLOGIO A LUCE

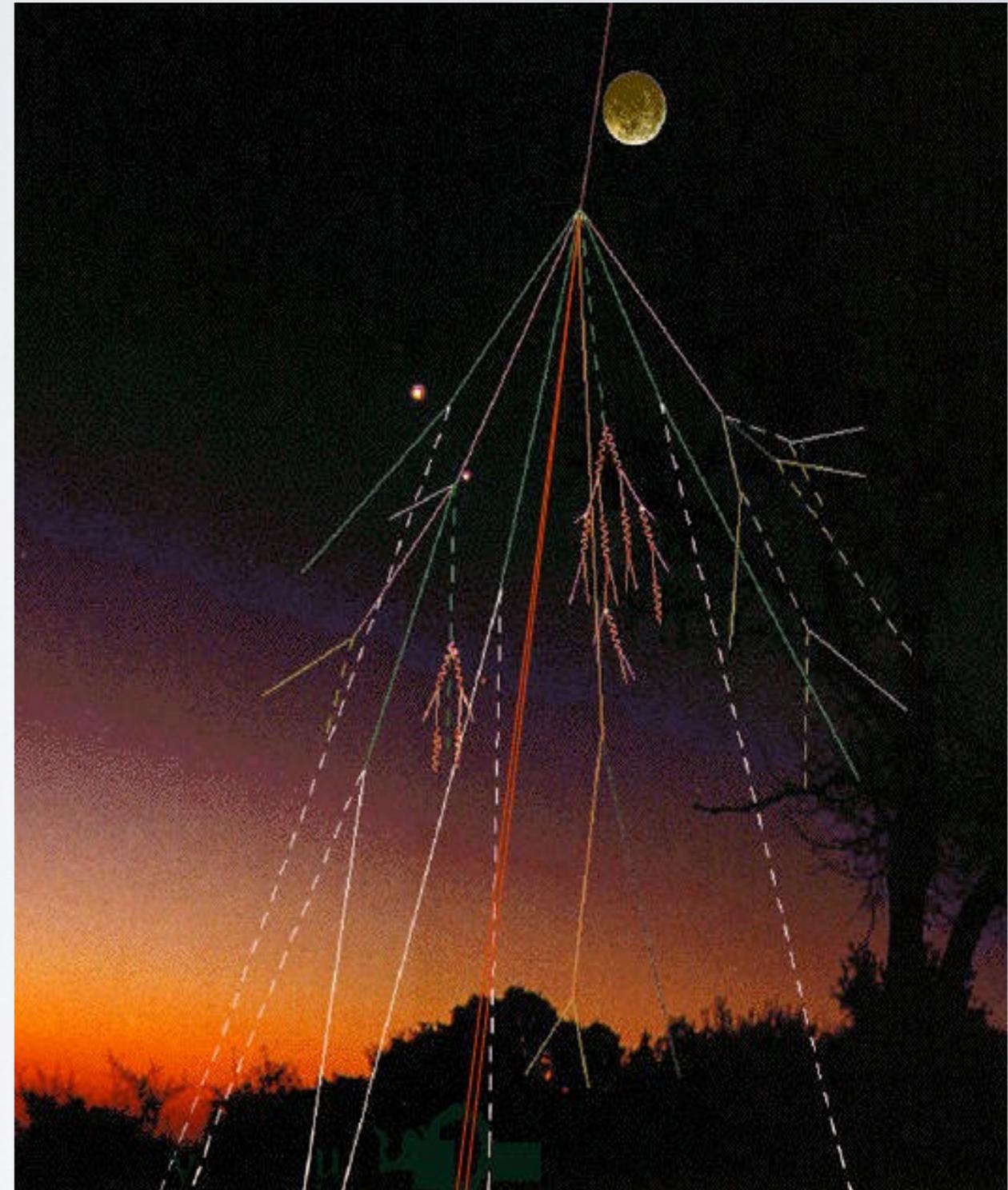


INCREDIBILE, MA VERO!

I muoni cosmici

Sono prodotti a circa 10 km di quota, ma vivono solo 2 milionesimi di secondo, perciò dovrebbero sparire dopo 600 m.

Eppure a livello del mare ce ne sono tanti ($100 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)!



COME SEMBRARE UN GENIO

■ La correzione può dipendere solo dalla velocità

$$\delta \simeq v$$

■ Ma la velocità è una grandezza vettoriale!

$$\delta \simeq \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = v^2$$

■ Ma la correzione deve essere adimensionale!

$$\delta \simeq \frac{v^2}{c^2}$$

$$t' \simeq (1 + \delta)t = \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)t$$

COME SCORRE IL TEMPO SUI SATELLITI GPS?

$$h=20,000 \text{ km} \Rightarrow t=60 \text{ ms}$$

$$v_{\text{SAT}}=4 \text{ km/s}=4000 \text{ m/s}$$

Il ritardo degli orologi di bordo è
 $v^2/c^2=0.2$ miliardesimi di secondo



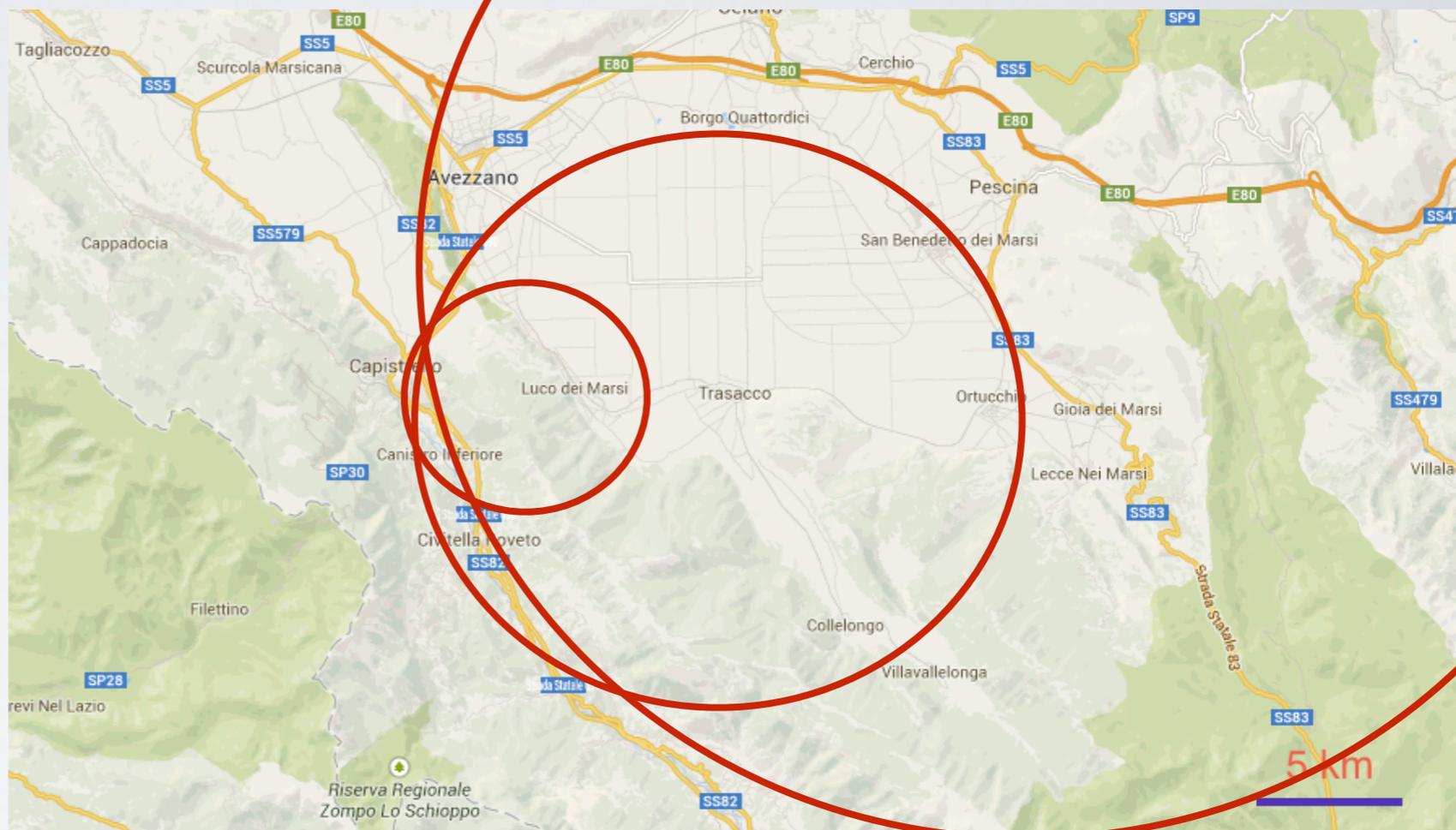
MA È DAVVERO UN RUMORINO DA NIENTE?

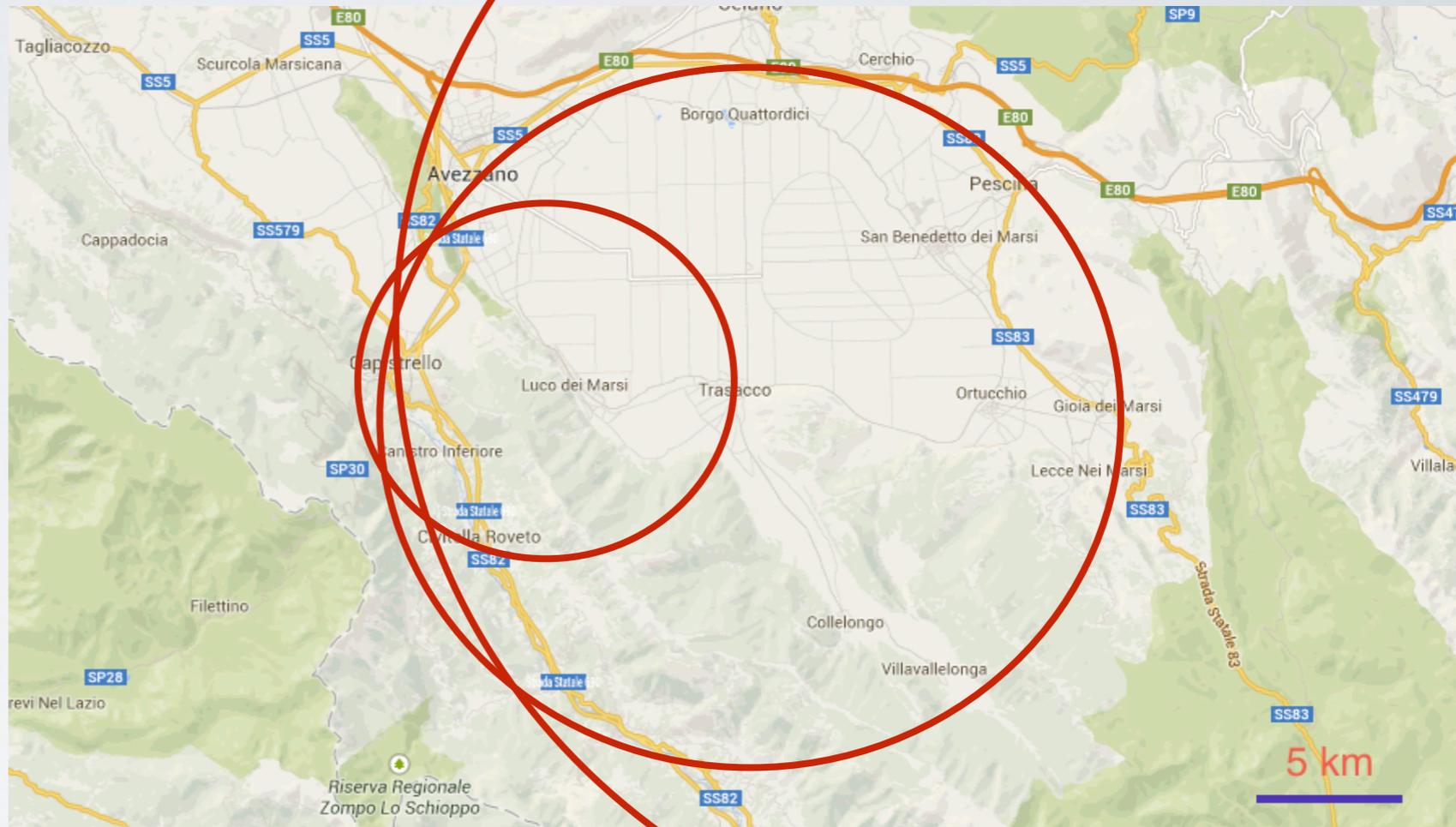
In 0.2 miliardesimi di secondo
la luce percorre 6 cm

In un giorno ci sono 86400
secondi

Ogni giorno il *ritardo* ammonta
a $6 \times 86400 \text{ cm} \approx 5 \text{ km}$







LA RELATIVITÀ GENERALE

Un sistema di riferimento accelerato è equivalente a un sistema di riferimento inerziale (non accelerato) in presenza di forze



LA RELATIVITÀ GENERALE

In un sistema di riferimento accelerato è come se ci fossero altre forze **fittizie** che si sommano a quelle **reali**



FORZE E GEOMETRIA

- In fisica classica è lo stesso, ma le forze appaiono grazie a un *trucco*: le forze apparenti
- In fisica relativistica un sistema accelerato equivale a un sistema inerziale in presenza di un campo di forze e viceversa
- In fisica relativistica le forze sono il risultato di una diversa geometria dello spazio-tempo
- Le masse curvano lo spazio-tempo e producono le forze gravitazionali

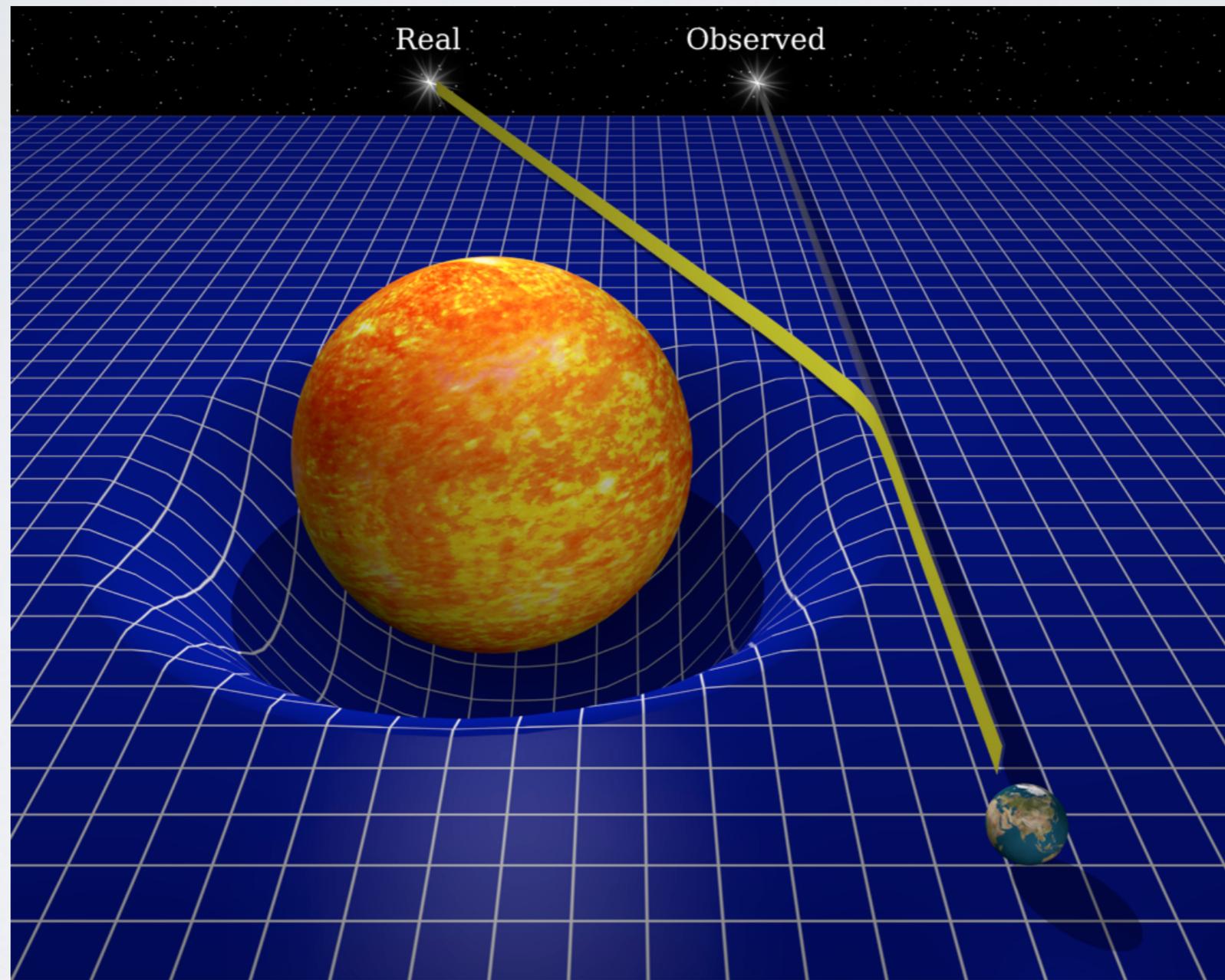
UN SISTEMA ACCELERATO



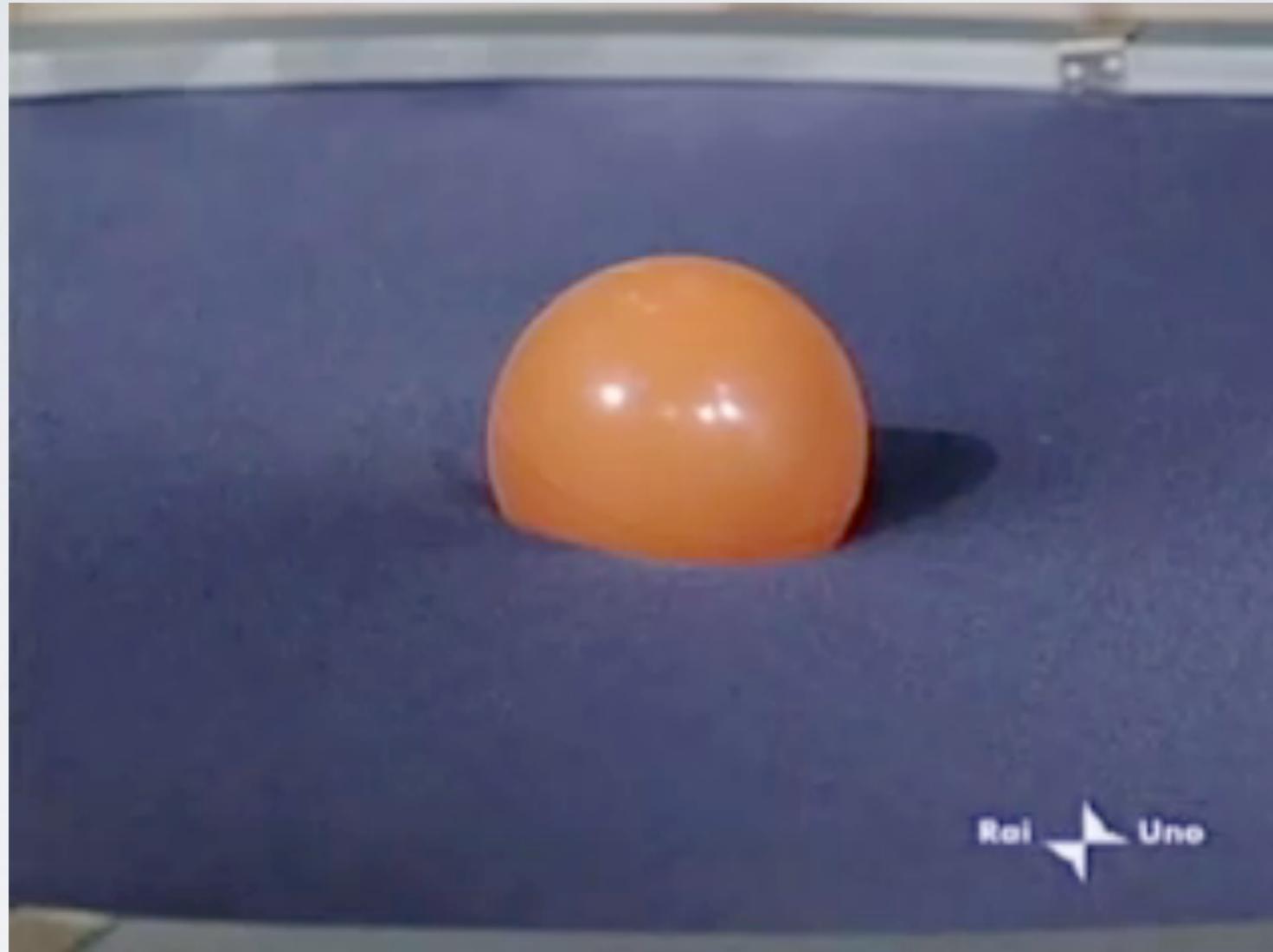
UN SISTEMA ACCELERATO



LA CURVATURA DELLO SPAZIO-TEMPO

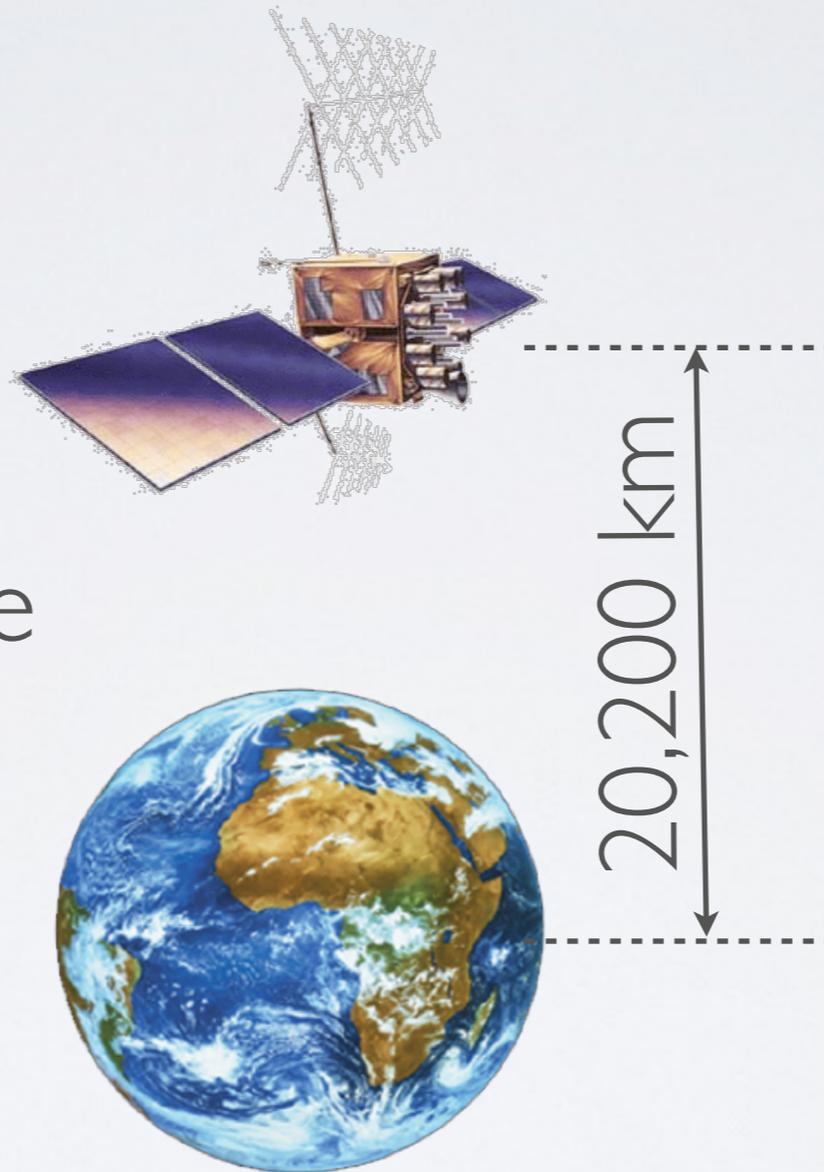


GRAVITÀ E CURVATURA



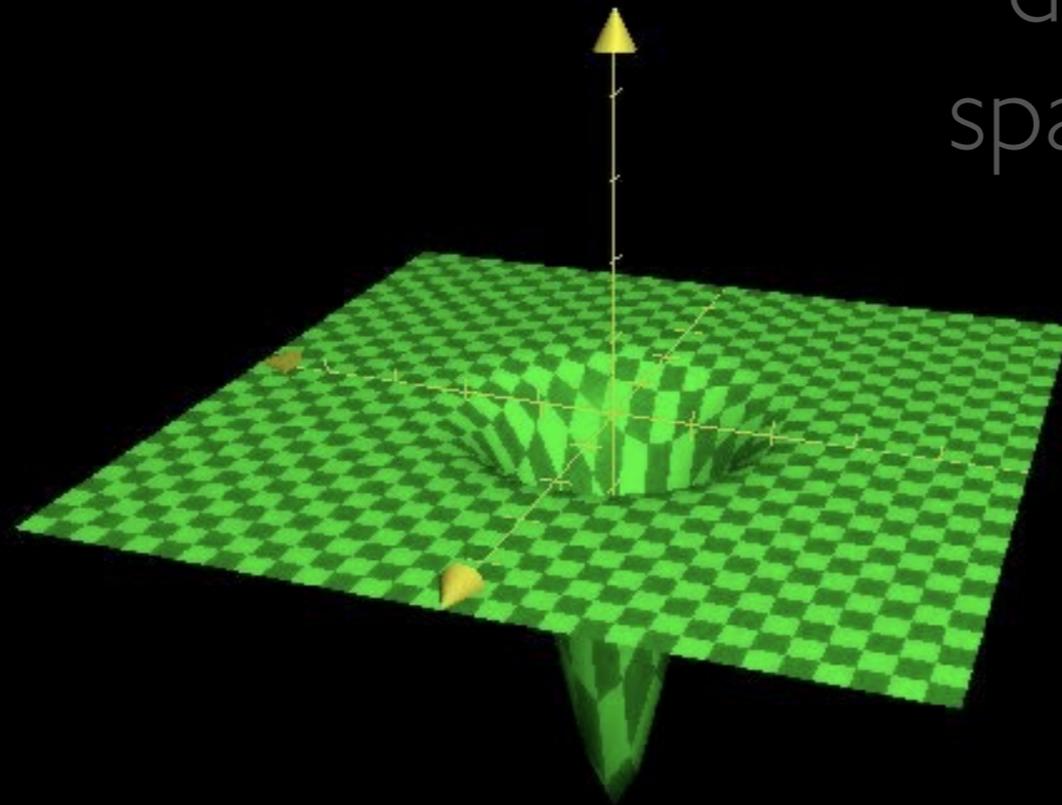
GRAVITÀ E CURVATURA

La forza di gravità è piú intensa sulla superficie terrestre che alla quota dei satelliti



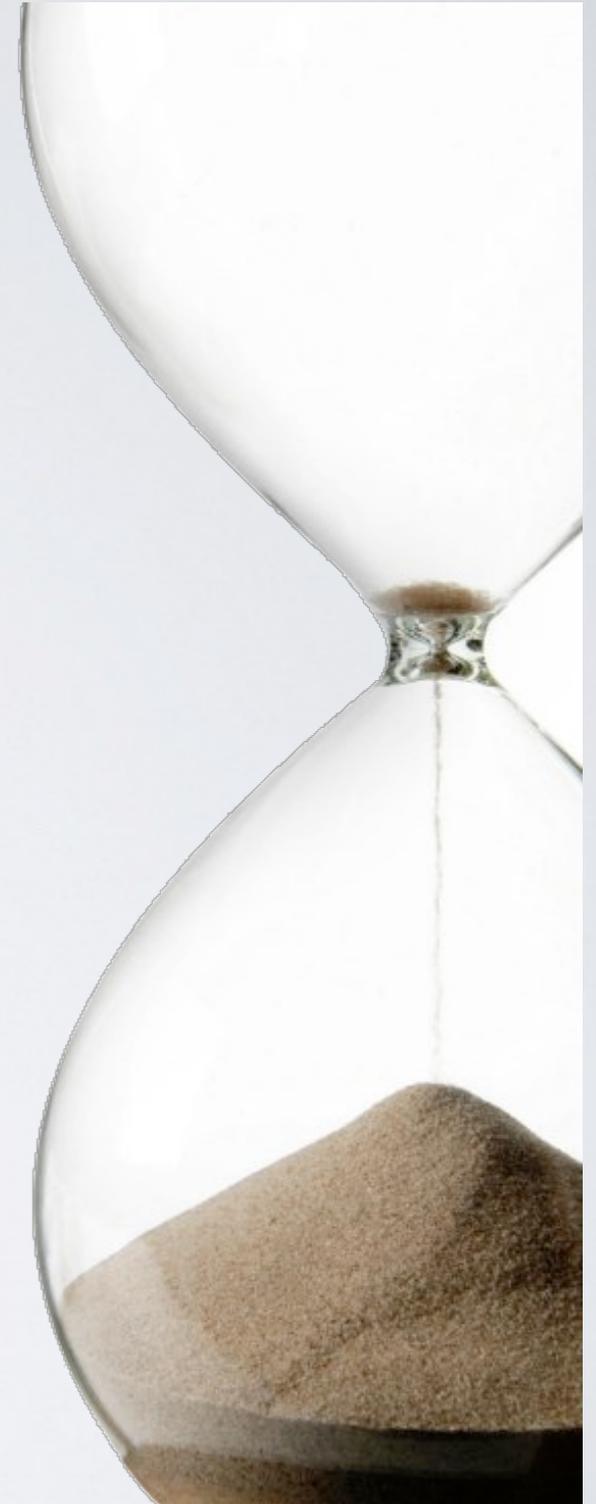
GRAVITÀ E CURVATURA

Sulla superficie
della Terra lo
spazio-tempo è
piú curvo

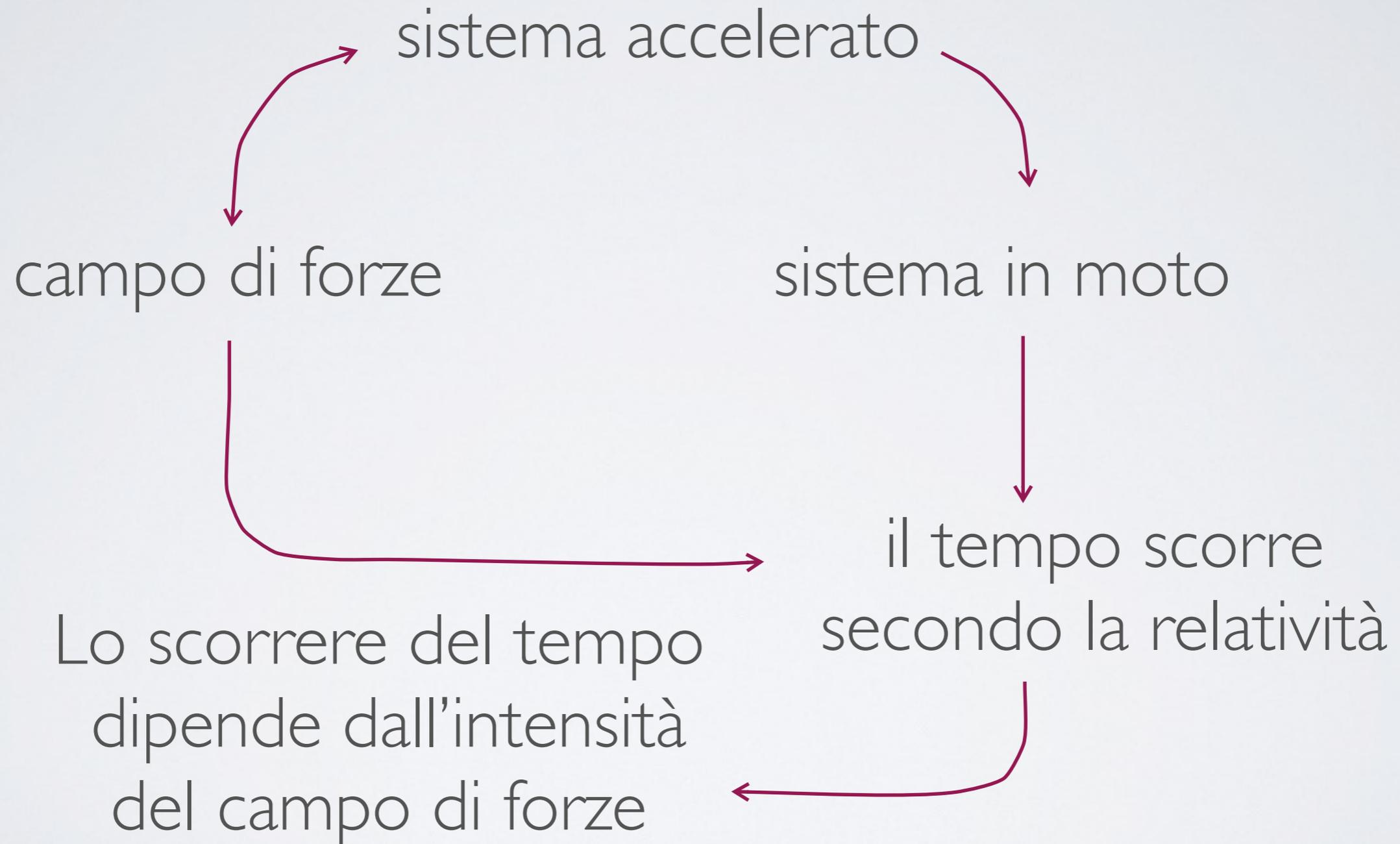


TEMPO E CURVATURA

- Dove lo spazio-tempo è piú curvo è come se ci si trovasse su un sistema piú accelerato
- Un sistema accelerato è un sistema in moto!
- Il tempo scorre piú lentamente in un sistema accelerato



RICAPITOLIAMO



COME SEMBRARE UN GENIO (2)

La correzione può dipendere solo dal potenziale gravitazionale

$$V = G \frac{M}{r}$$

Il potenziale ha le dimensioni di una velocità al quadrato, ma la correzione deve essere adimensionale

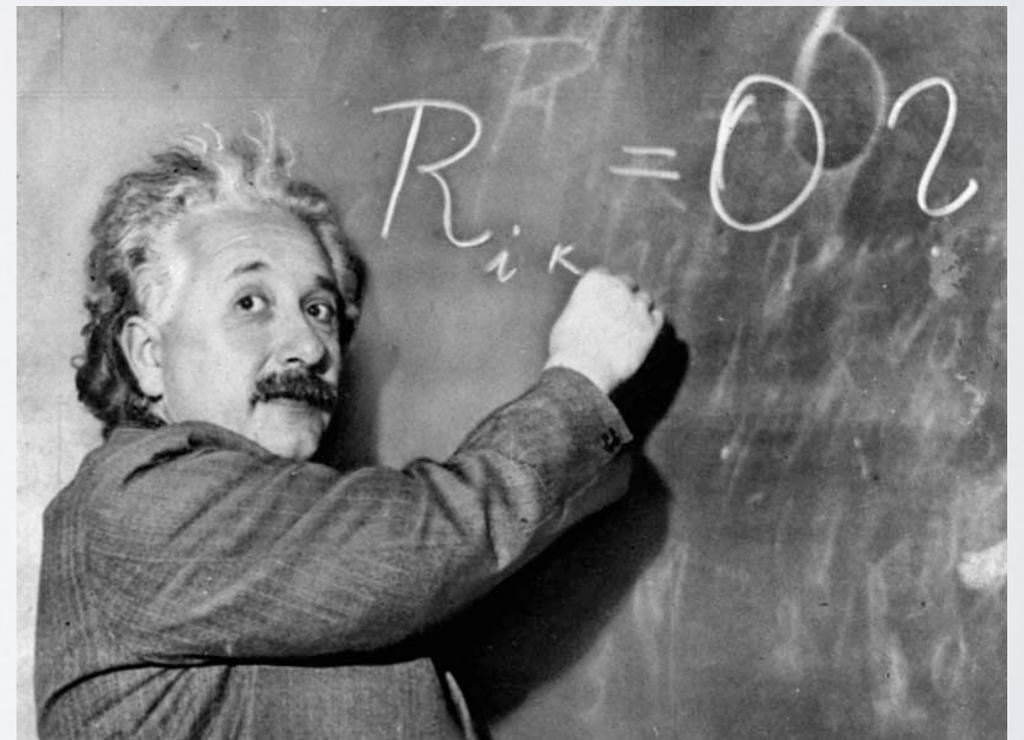
$$\delta \simeq \frac{V}{c^2}$$

$$t' = (1 + \delta)t = \left(1 + \frac{GM}{c^2} \frac{1}{r}\right) t$$

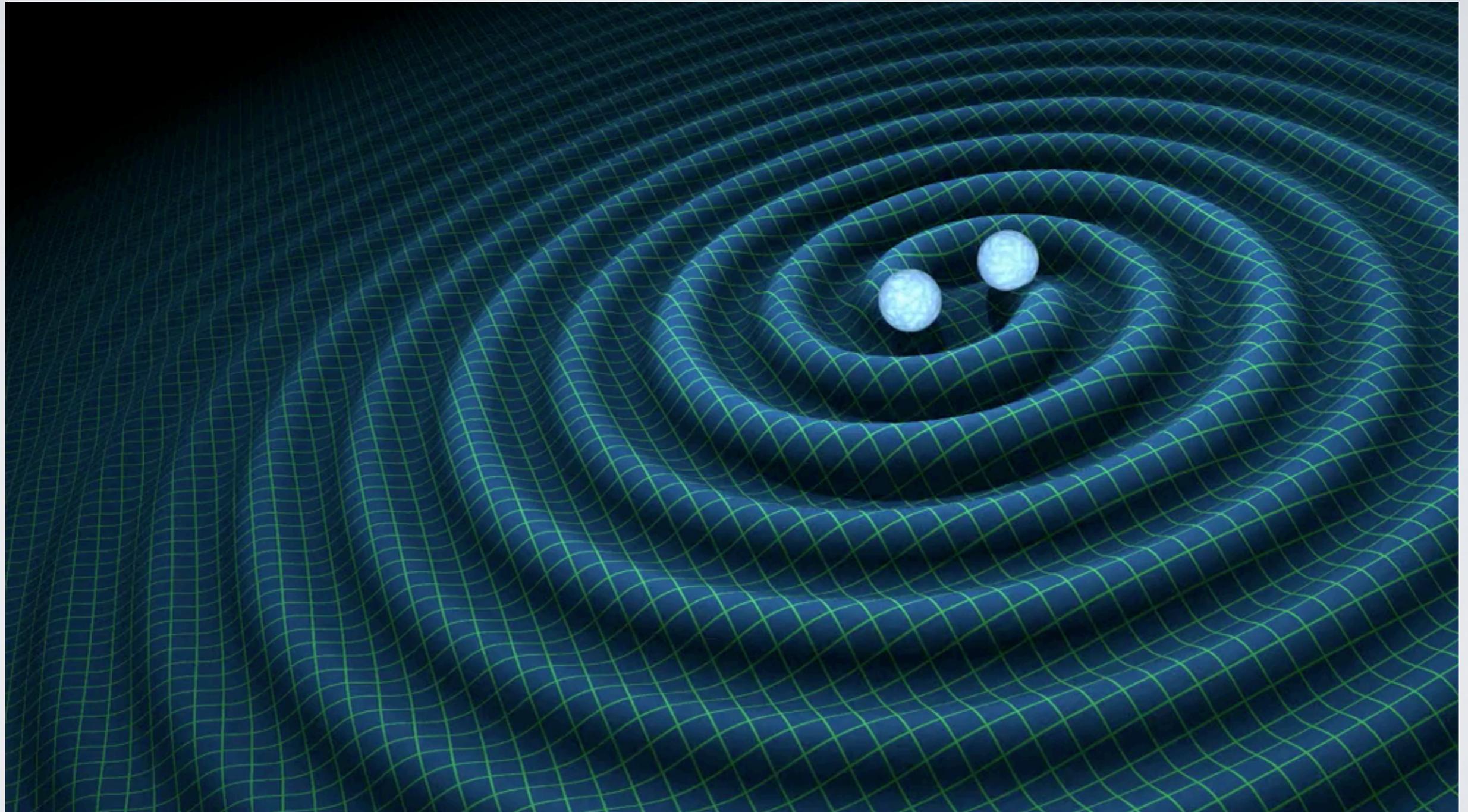
EFFETTI GRAVITAZIONALI SUL TEMPO

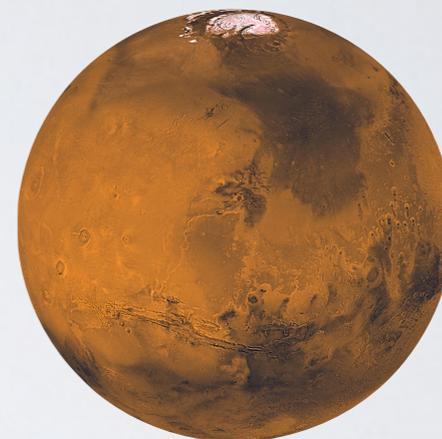
- La differenza tra la durata di un secondo a Terra e a bordo è di 0.7 miliardesimi di secondo
- Complessivamente gli orologi a Terra sono in ritardo di 0.5 miliardesimi di secondo rispetto a quelli di bordo

$$\delta t = \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{r_T} - \frac{1}{r_{GPS}} \right)$$

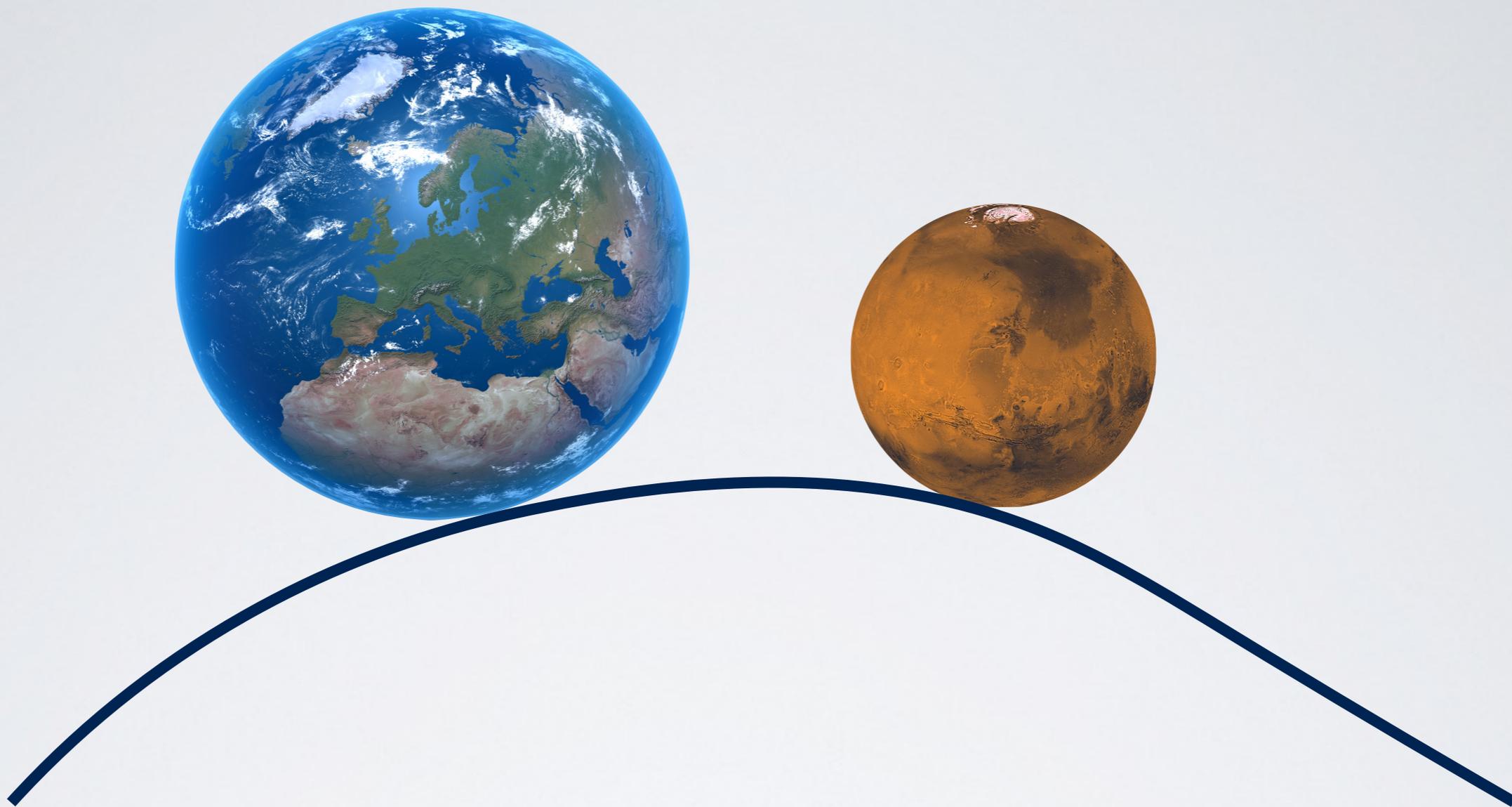


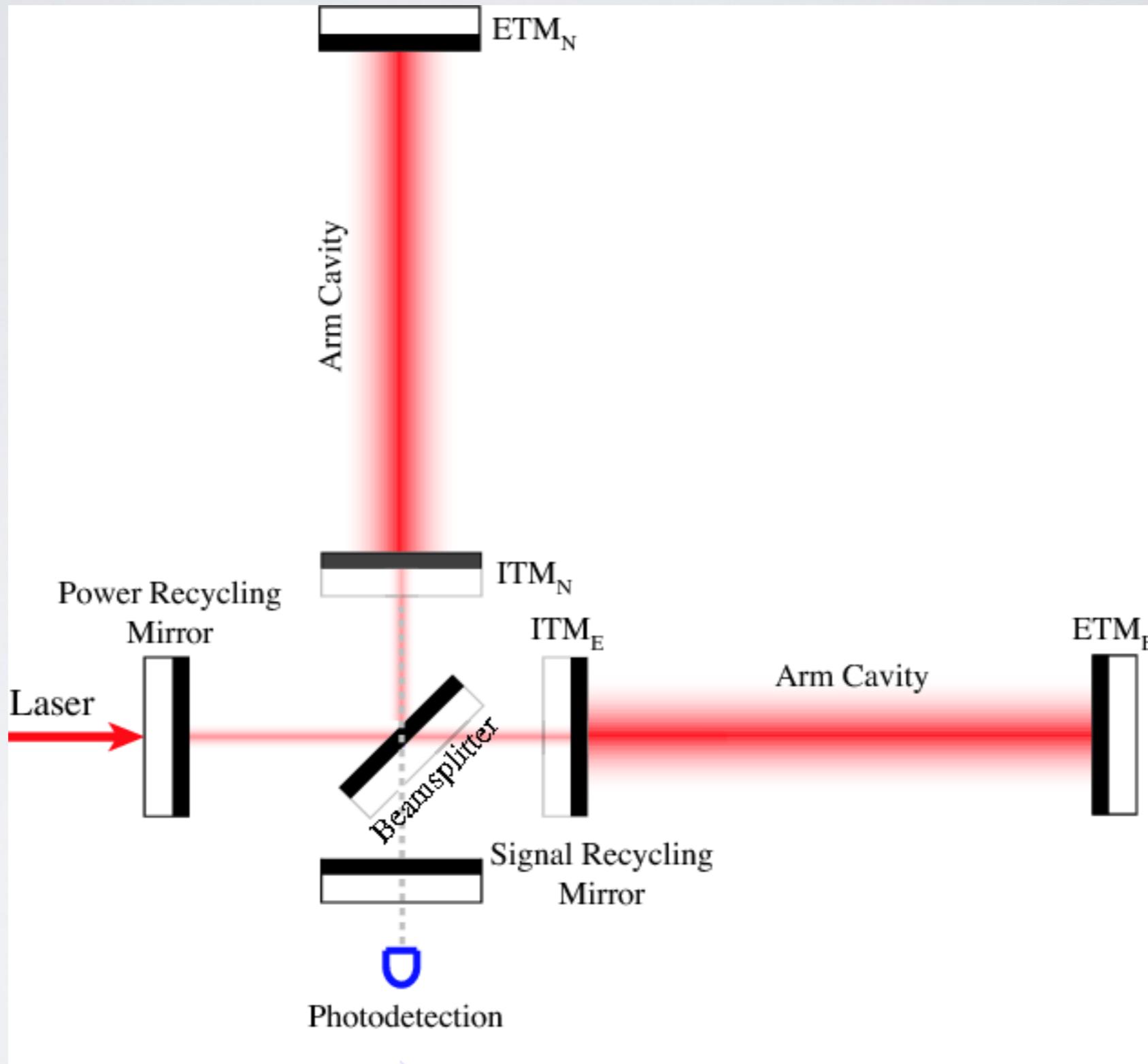
LE ONDE GRAVITAZIONALI

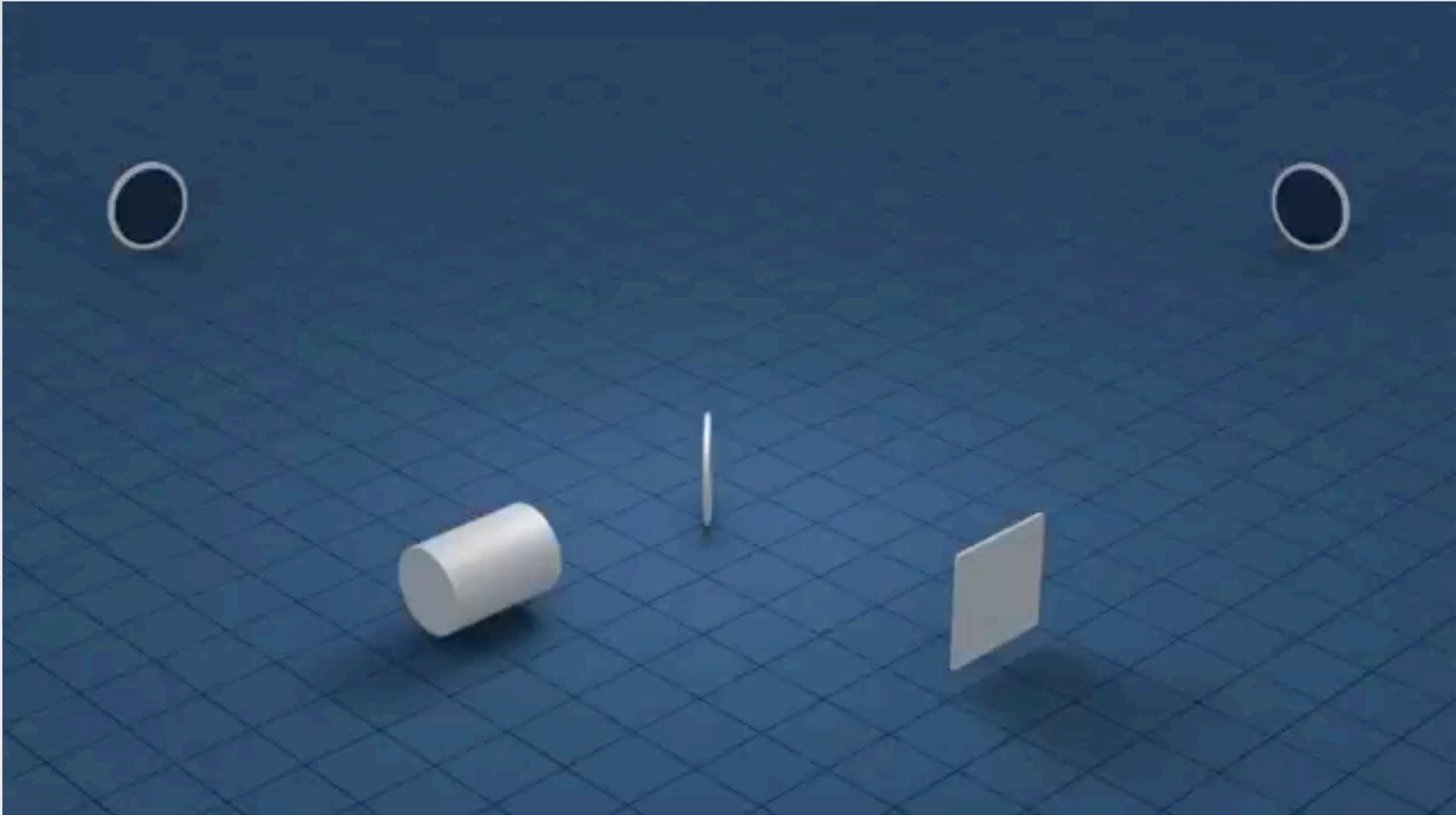




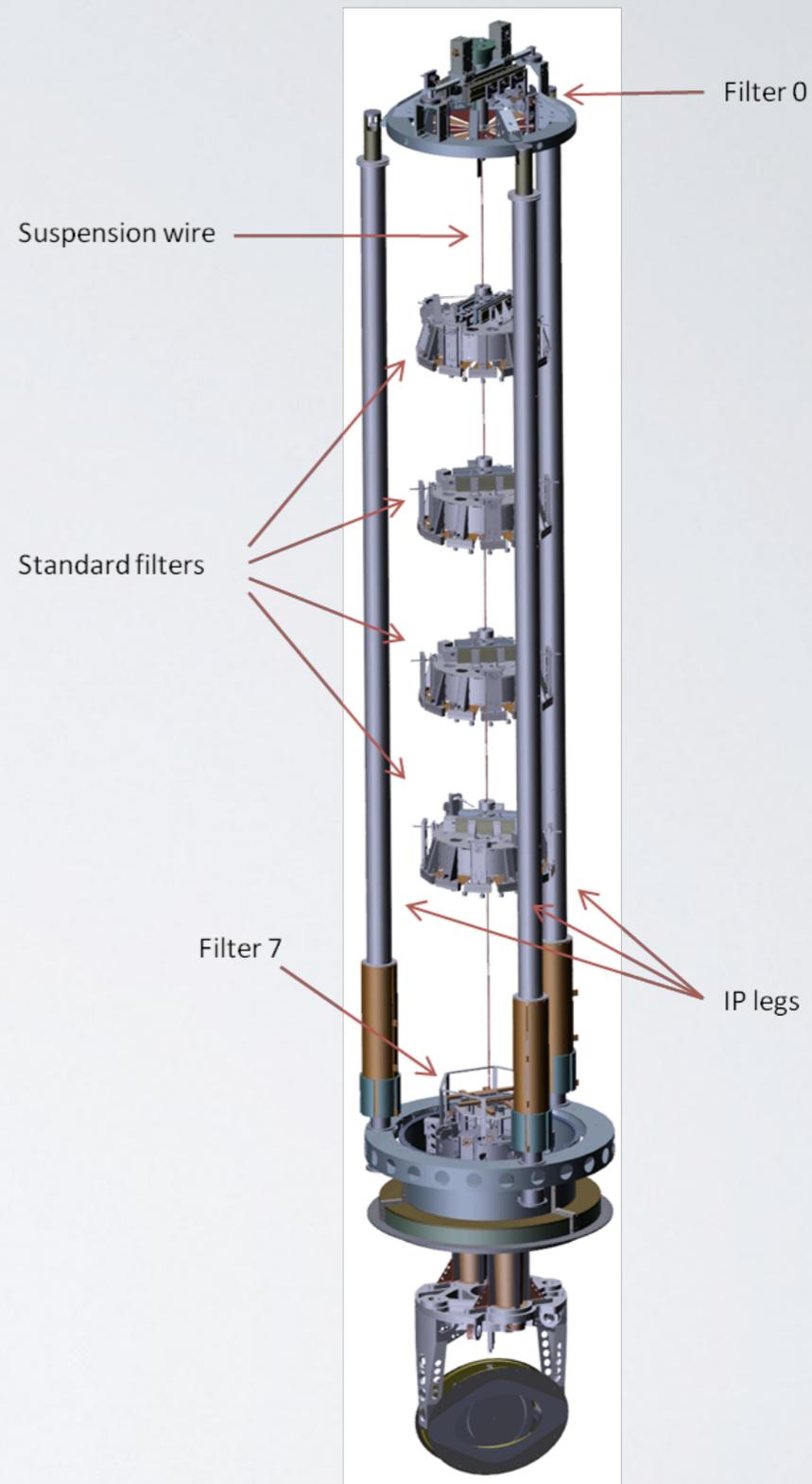
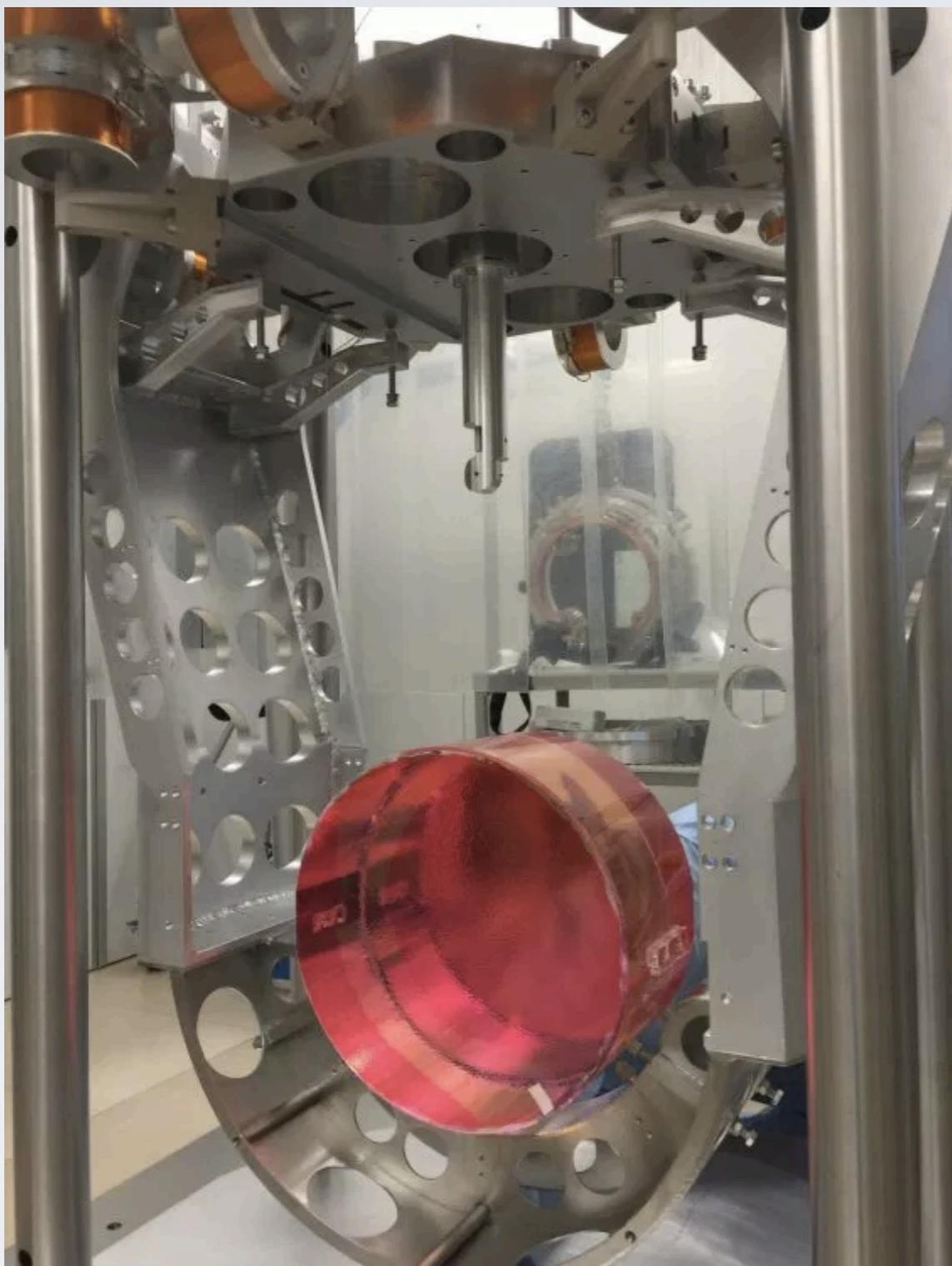


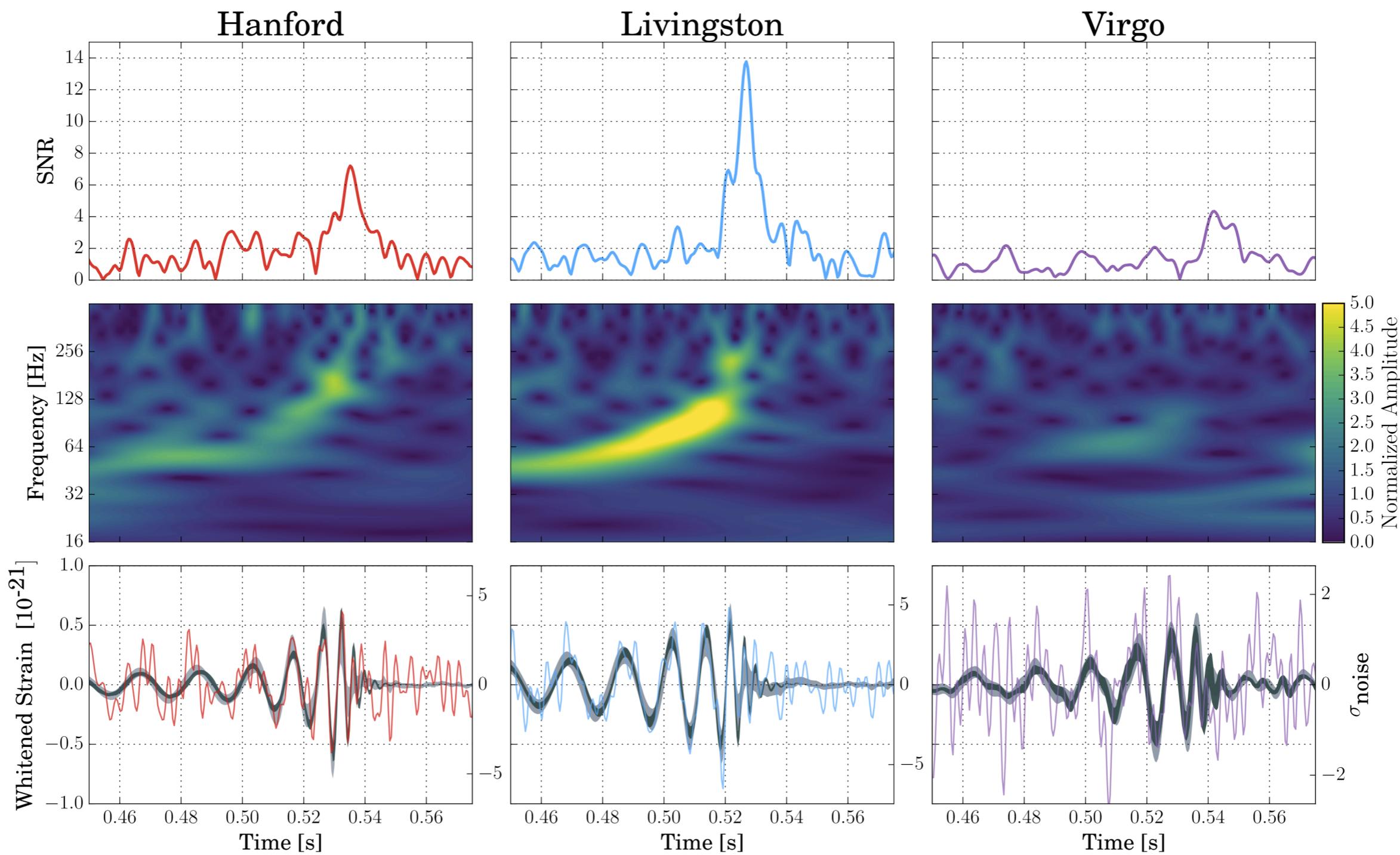












CONCLUSIONI

- La fisica della relatività è considerata da tutti un *passatempo* per scienziati o un tema divertente per i film di fantascienza
- Ma la curvatura dello spazio-tempo non solo è reale, ma è di fondamentale importanza per il corretto funzionamento di un dispositivo di uso comune, come il navigatore GPS
- Il ruolo della ricerca di base, motore del progresso, non solo tecnologico

RISORSE

<http://www.giovanniorgantini.it>

<http://www.radioscienza.it/fisicast>

<http://patreon.com/giovanniorgantini>