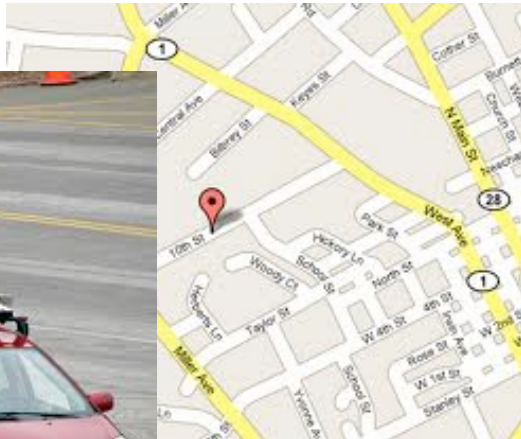


# Fisica in barca

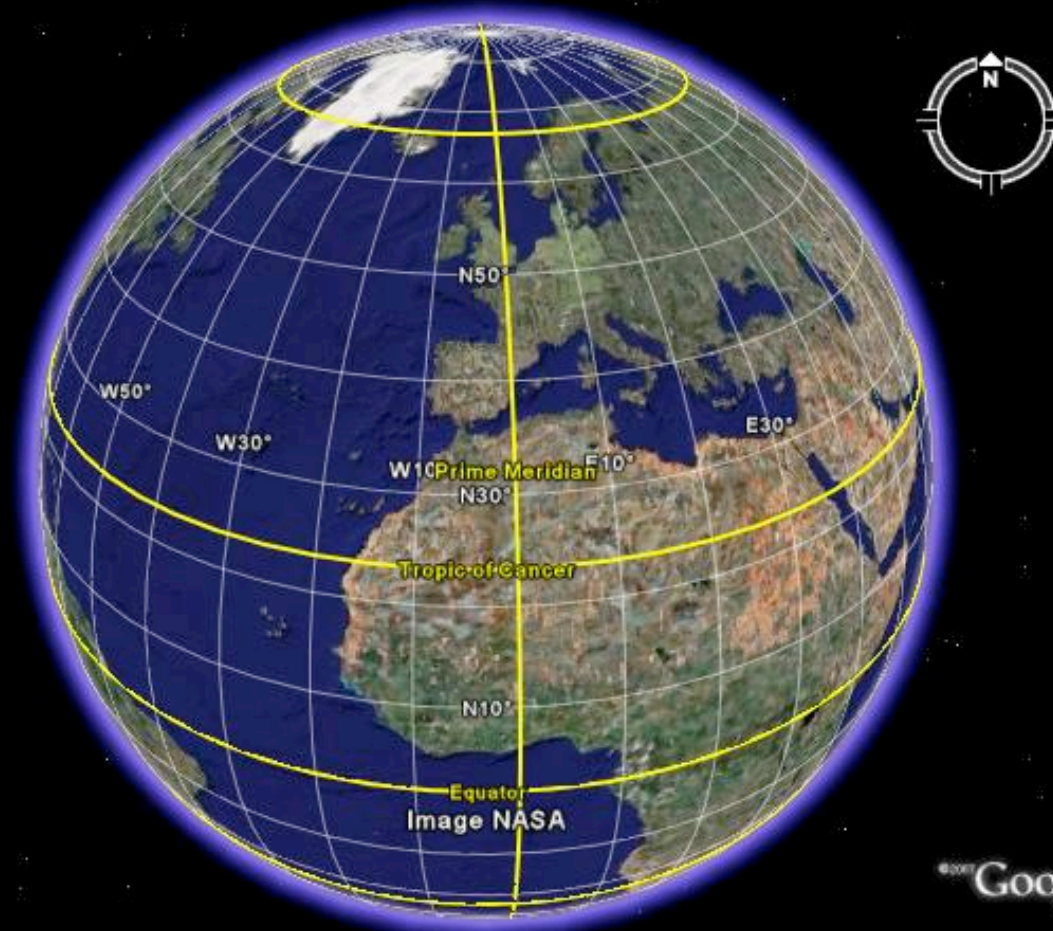


## GPS

Global Positioning System



Tutto basato sul GPS!



Pointer lat 32.084895° lon -3.048734° Streaming ||||| 100% Eye alt 11001.00 km

# Dove mi trovo?

Quale è la mia latitudine?

Quale la mia longitudine?

# Dove mi trovo?

Quale è la mia latitudine?

Quale la mia longitudine?



Situazione “facile”...



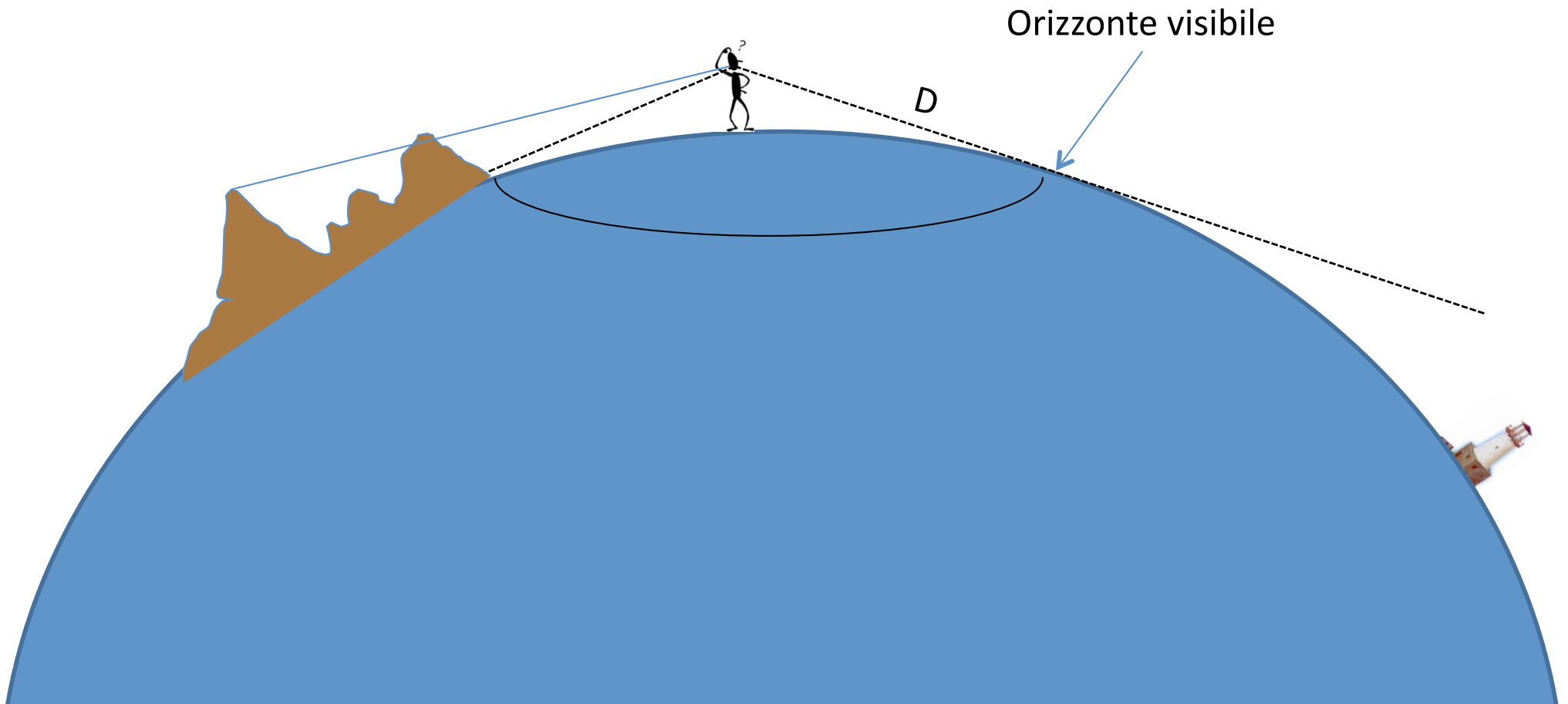
Situazione “complicata”...

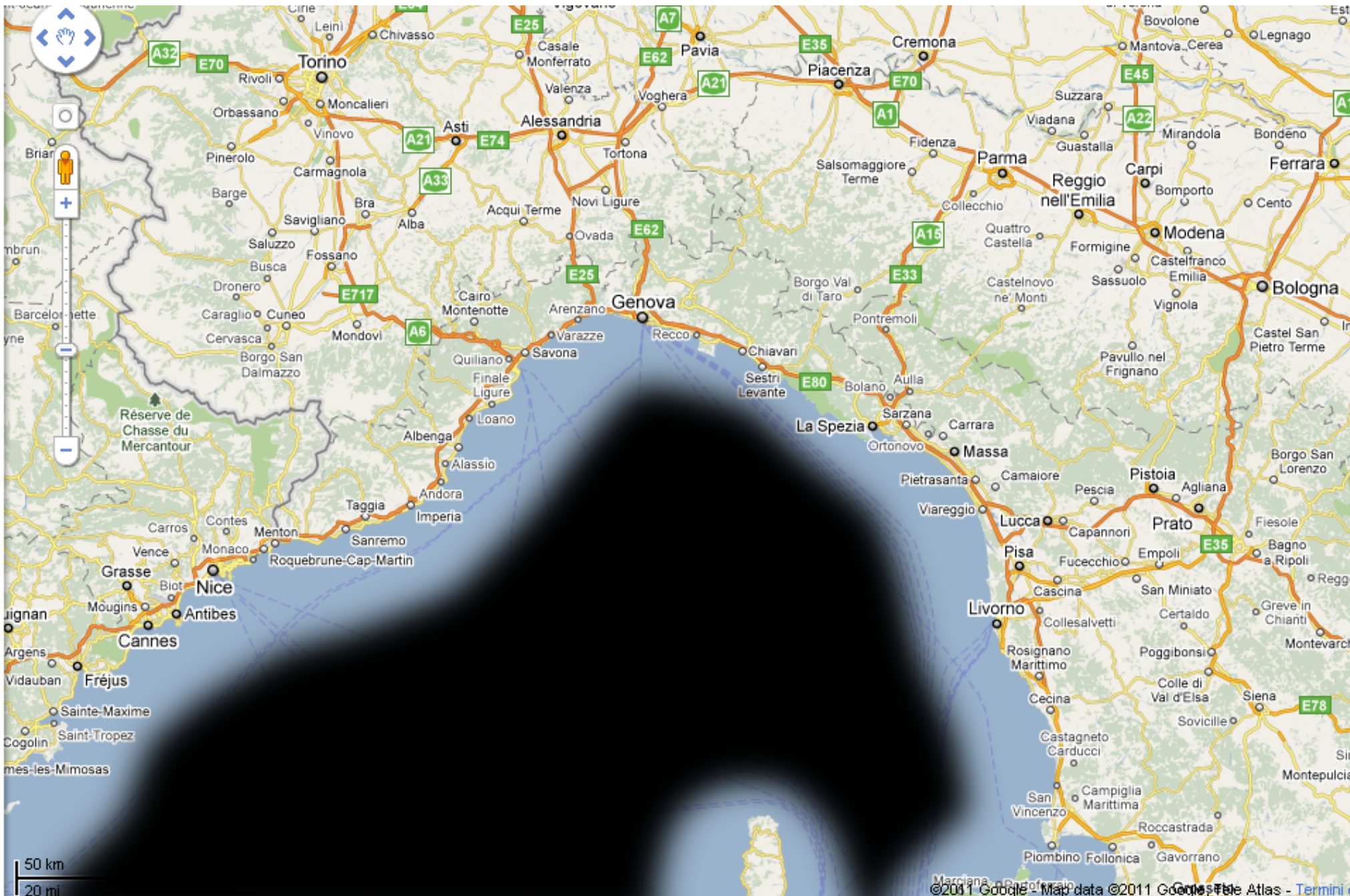
il piano degli occhi a 1,6 metri di altezza,  
l'orizzonte visibile è di 4,5 km

$$D = 3,57 \cdot \sqrt{h}$$

D in km, h in metri

Una montagna alta **1000m** (1km) è visibile  
da circa **112 km**



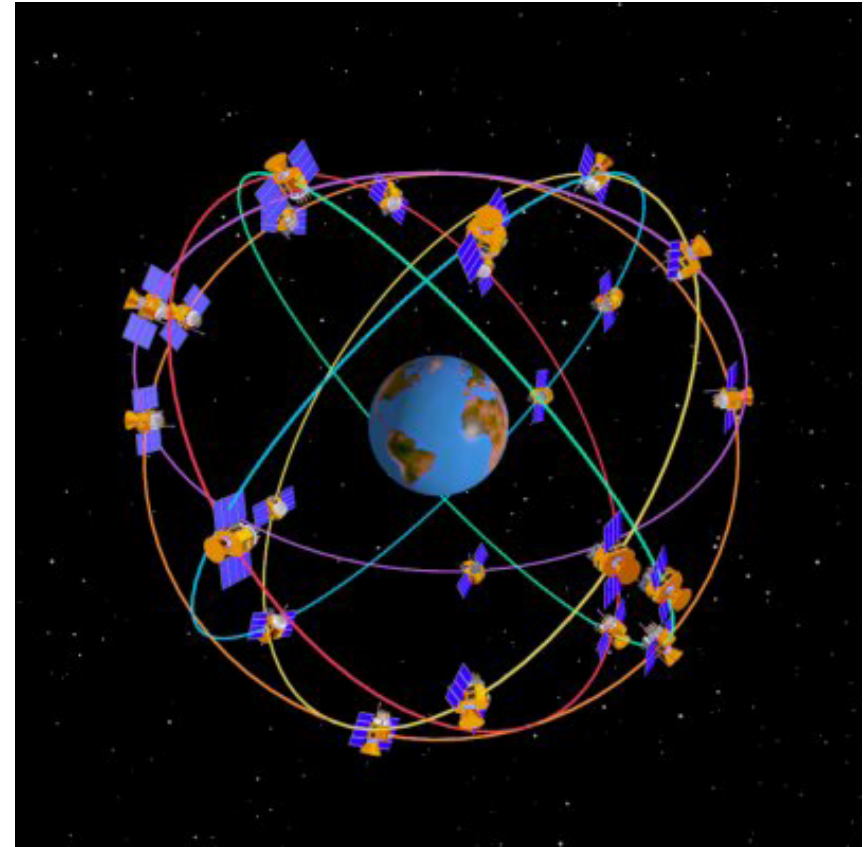


# Triangolare la propria posizione



Ma chi mi fornisce queste informazioni?

- 24 satelliti in orbita a circa 20000 km d'altezza
- 6 orbite inclinate di 55° sull'equatore
- almeno 4 sempre visibili ovunque
- ogni satellite ha un orologio atomico al cesio con precisione di 1 su  $10^{14}$   
*1 giorno = 24x60x60 s = 86400 s*  
*Errore al giorno: 0.86 ns*



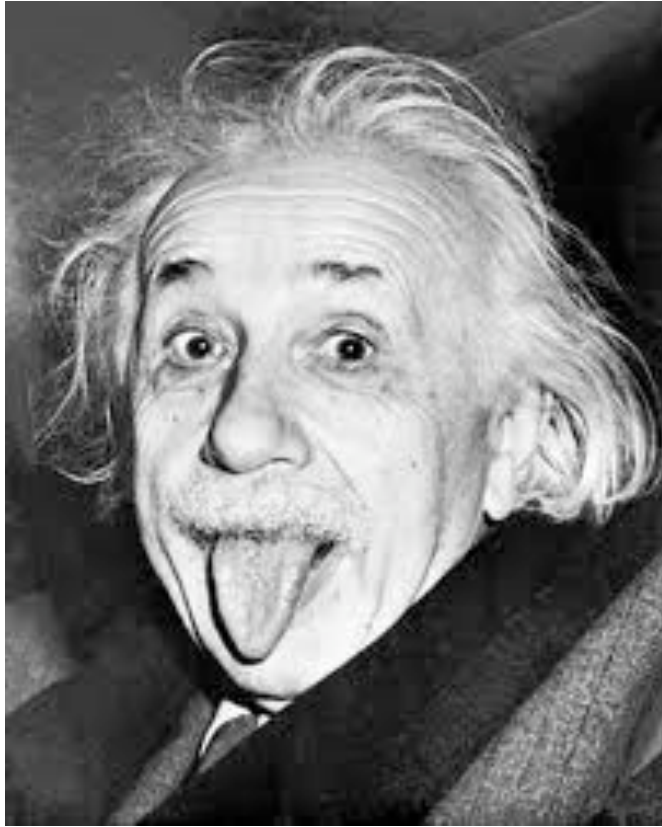
Almeno 4 satelliti mi mandano frequentemente un segnale che contiene l'ora esatta (al ns circa) dell'istante in cui il segnale è partito e la posizione del satellite (orbite ellittiche)

I satelliti trasmettono anche la loro posizione nello spazio





Con 0.86 ns di errore, la precisione può essere di circa 30 cm (in teoria)



Cosa c'entra Albert Einstein?

Senza una conoscenza accurata della

**Teoria della Relatività**

**Ristretta**

e della

**Teoria della Relatività**

**Generale**

(la teoria completa della Gravitazione)

Il GPS non funzionerebbe

Il fatto che la velocità della luce sia una costante universale implica che  
il nostro concetto intuitivo di spazio e tempo vada  
rivisto

## Teoria della Relatività Ristretta:

Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano intervalli di tempo e lunghezze diverse

Il tempo si dilata, quindi un orologio appare andare più piano

lo spazio si contrae (I satelliti GPS sono in moto...!)



Un orologio in movimento va più piano di un orologio in quiete.

- Velocità del satellite: 3.8 km/s

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 1,00000000000834 \quad \Rightarrow \quad 7.1 \mu s / g$$

A 100 km/h 1,0000000000000000428
-------------------------------------

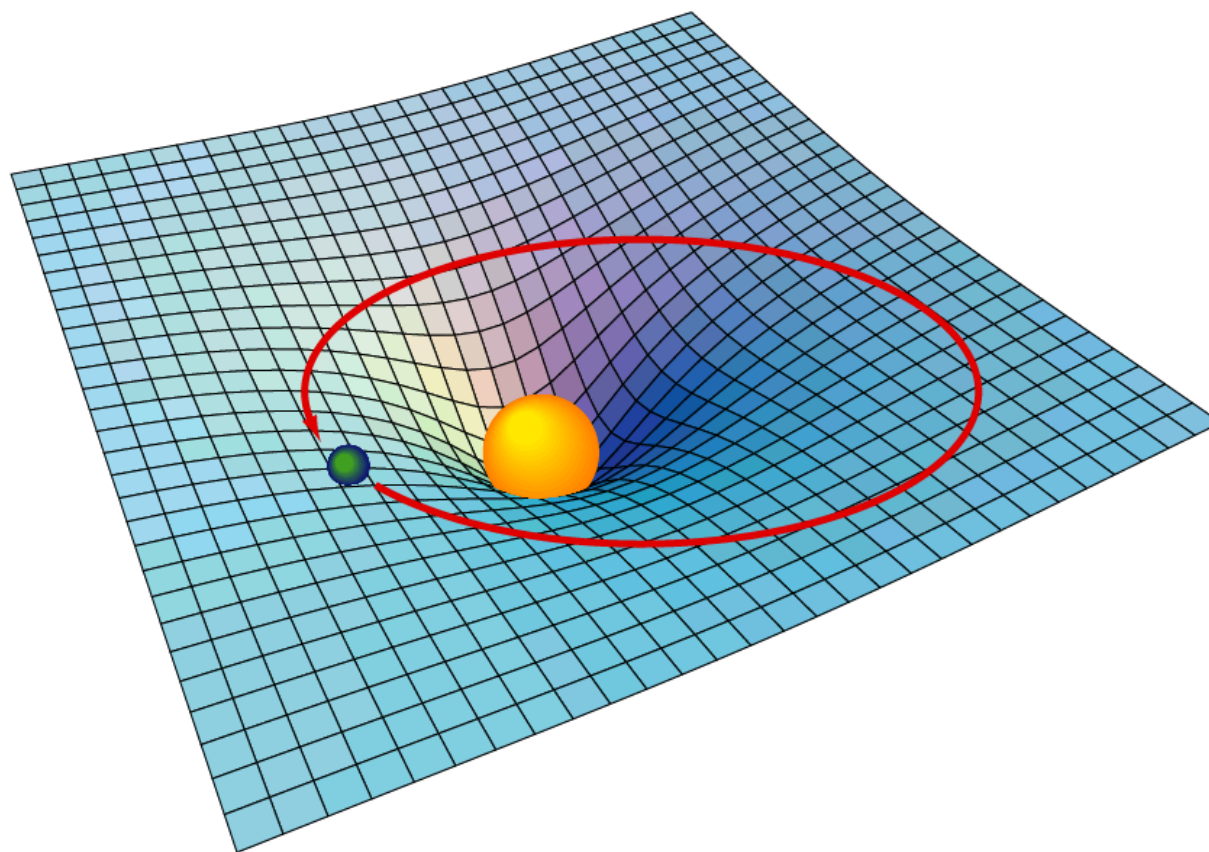
- $c = 300.000 \text{ km/s}$  (velocità della luce)
- Questo è l'errore indotto dal moto del satellite a causa della relatività:

$$7.1 \mu s \cdot c = 2.2 \text{ km}$$

(“tra 50 metri svoltate a destra!” → “tra 2.2 km svoltare a destra”)

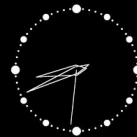
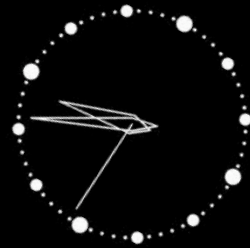
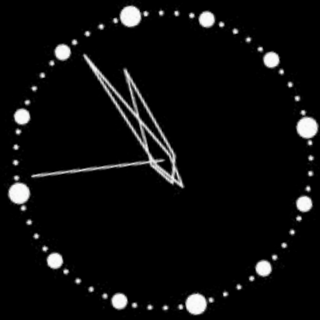
# Teoria della Relatività Generale

Un campo gravitazionale curva lo spazio-tempo



Gli orologi a Terra sono in un campo gravitazionale molto più grande di quello che sentono i satelliti a circa 20000 km d'altezza.

**45.7  $\mu$ s al giorno!**



**senza correzione, 15 km di errore!**

("tra 50 metri svoltate a destra!" → "tra 15 km svoltare a destra")

Una volta capita la fisica, la soluzione è **semplice**...

- Gli orologi dei satelliti vanno volutamente ad una velocità diversa (quindi non sono uguali a quelli a Terra)
- I clock nominali a Terra vanno a 10.23000000000 MHz
- Quelli sui satelliti: 10.2299999954326 MHz
- Vi sono ancora alcuni effetti PERIODICI legati all'orbita non circolare dei satelliti, e al cosiddetto effetto Sagnac (legato alla rotazione della Terra) che sono corretti sul ricevitore perchè dipendono dalla posizione relativa fra ricevitore e satelliti nonché dalla latitudine...



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI GENOVA

# BUONA NAVIGAZIONE!!!