

ONDE GRAVITAZIONALI

ECCOLE FINALMENTE!

Renzo
Rancoita

Claudio
Papuzza

27/05/2016

cpapuzza@yahoo.it

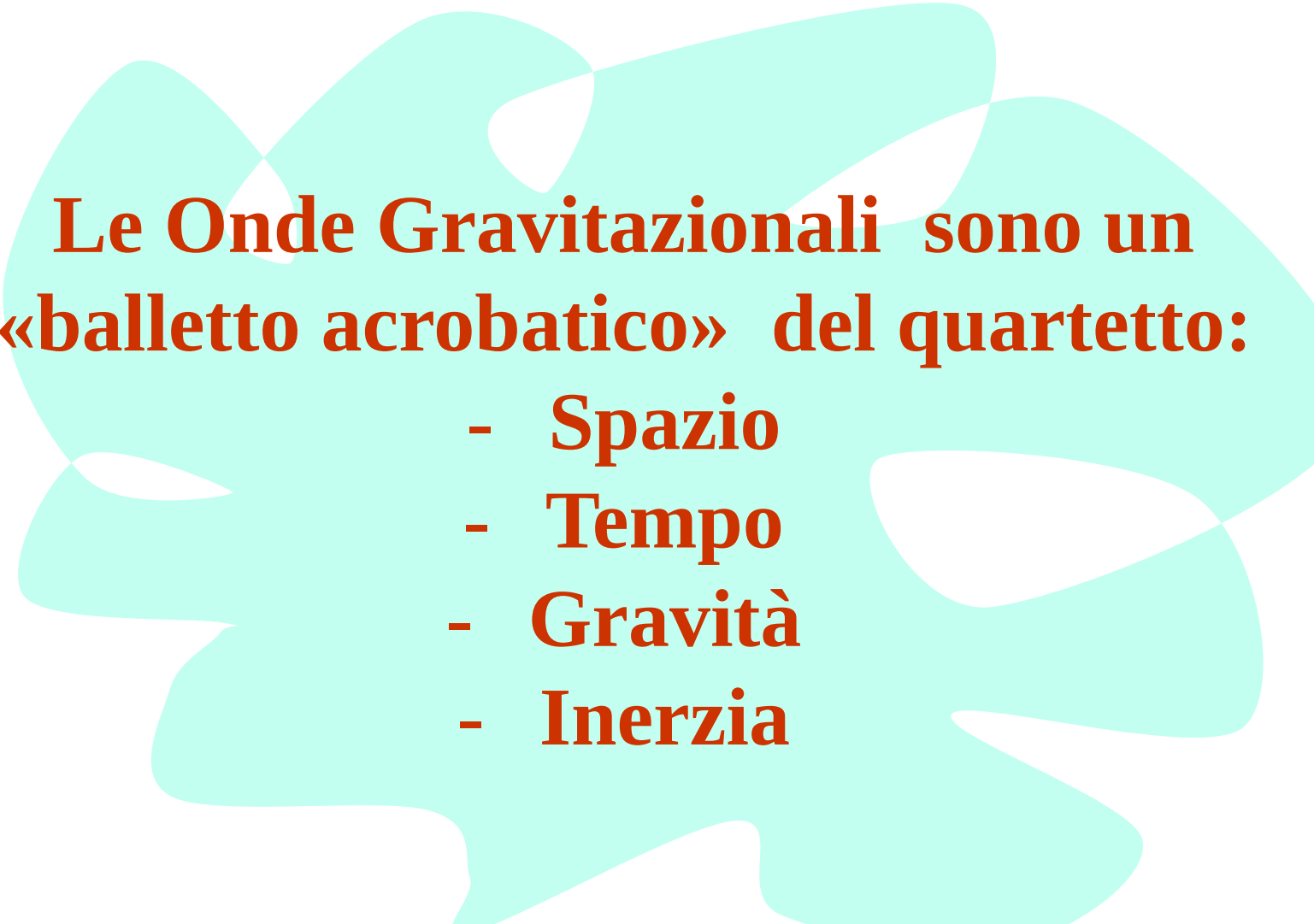


Bibliografia

- **Albert Einstein** – “*Autobiografia scientifica*” – **Boringhieri** 1949
- **George Gamov** – “*Biografia della fisica*” – **Mondadori** 1963
- **Giorgio Ferrero** – “*Elementi di calcolo Tensoriale*” – **Tirrenia** 1966
- **Albert Einstein** – “*Opere scelte*” – **Boringhieri** 1988
- **Enrico Persico** – “*Introduzione alla fisica matematica*” – **Zanichelli** 1971
- **Ludovico Geymonat** – “*Storia del pensiero filosofico e scientifico*” **Garzanti** 1971
- **Emilio Segrè** – “*Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*” – **Mondadori** 1976
- **Paul C. W. Davies** – “*The search for Gravity waves*” – **Cambride** 1980
- **Sean Carrol** – “*Lecture Notes on General Relativity*” – **University of California** 1997
- **Tullio Regge** – “*La relatività di Eistein*” **CD ROM – Virt Lab- Zanichelli** 1997
- **Donald Marolf** – “*Notes on Relativity and Cosmology*” **Syracuse University** 2001
- **Abraham Pais** – “*Einstein*” – **La biblioteca di Repubblica** 2006
- **David Blanco Lacerna** – “*Einstein: la teoria della relatività*” **RBA** 2016

Indice

1. **Gravità e Relatività**
2. **Onde e Onde Gravitazionali**
3. **Rilevazione di Onde Gravitazionali**
4. **Onde Gravitazionali come strumento analitico**

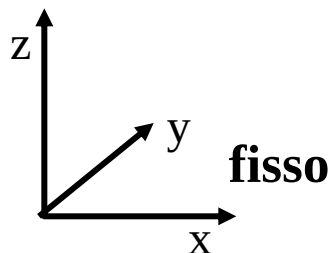


**Le Onde Gravitazionali sono un
«balletto acrobatico» del quartetto:**

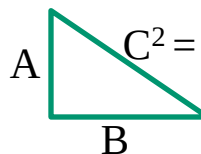
- Spazio**
- Tempo**
- Gravità**
- Inerzia**

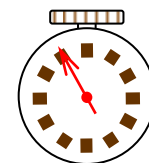
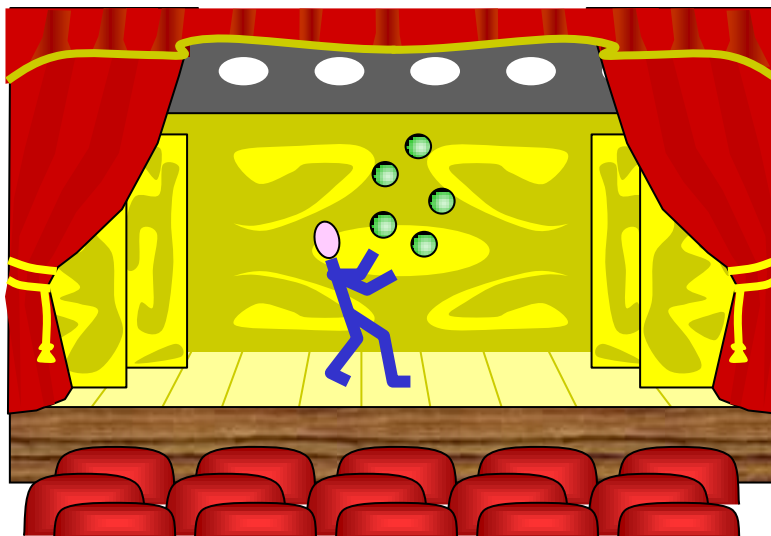
Spazio e Tempo

Galileo (1632) Newton (1687) nei "Principia"




$$C = 2 \pi R$$
$$\pi = 3,141592..$$

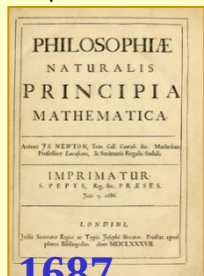

$$C^2 = A^2 + B^2$$



**scorre sempre
per tutti in
modo uguale**

Lo spazio e il tempo sono "il palcoscenico" (assoluto, immutabile) su cui si svolgono i fenomeni
(la GEOMETRIA è la teoria dello spazio)

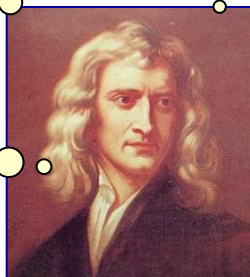
La Gravitazione Universale



1687

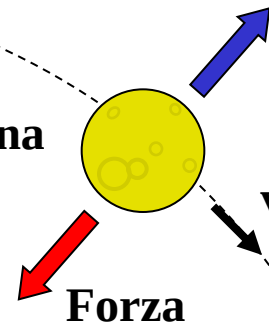
è la stessa
forza!

$$F = \frac{m M G}{R^2}$$



Isaac Newton 1667

luna



$$F = \frac{m v^2}{R}$$

mela

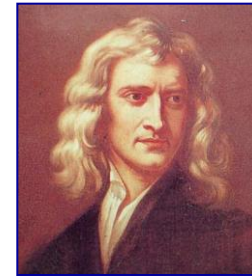
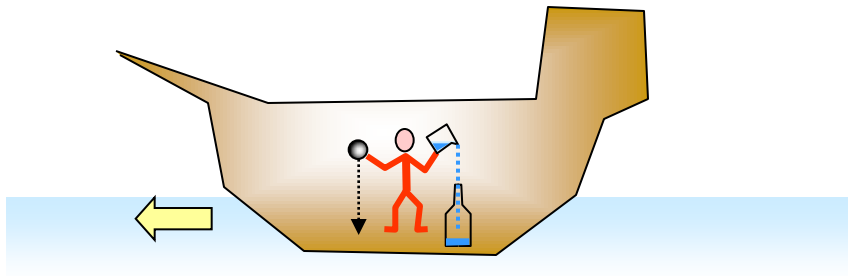


Forza

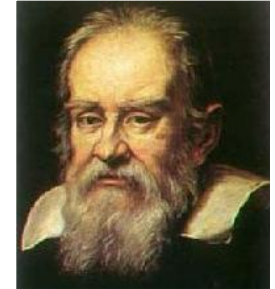
Inerzia

1632 Galileo Galilei

non c'è un riferimento “assoluto”



Isaac Newton 1667



... i corpi si muovono a velocità costante finché
non interviene una forza ad accelerarli ...

massa

forza

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$$

accelerazione = variazione delle velocità

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$
$$\mathbf{a} = \frac{v^2}{R}$$
A diagram illustrating acceleration as a change in velocity. It shows two parallel yellow arrows representing constant velocity. Then, it shows a yellow arrow turning into an orange arrow, representing a change in direction. The radius of curvature of this turn is labeled 'R'.

Peso Massa e Gravità

Lasciando cadere due corpi di diverso peso:

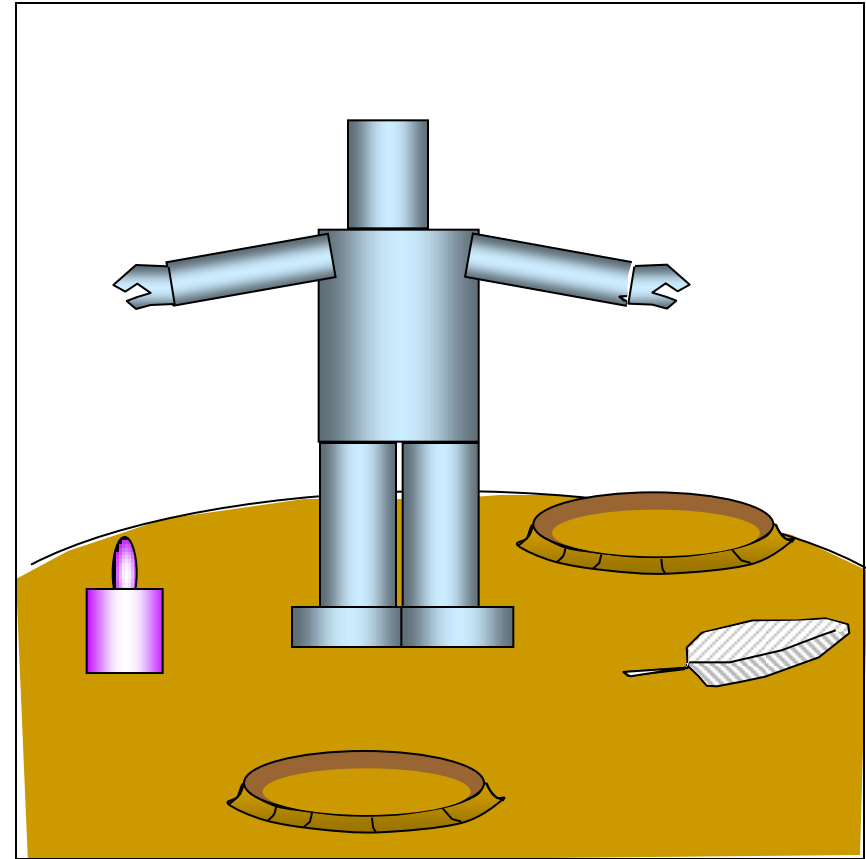
Aristotele

Cadono prima i corpi a peso maggiore

Galileo

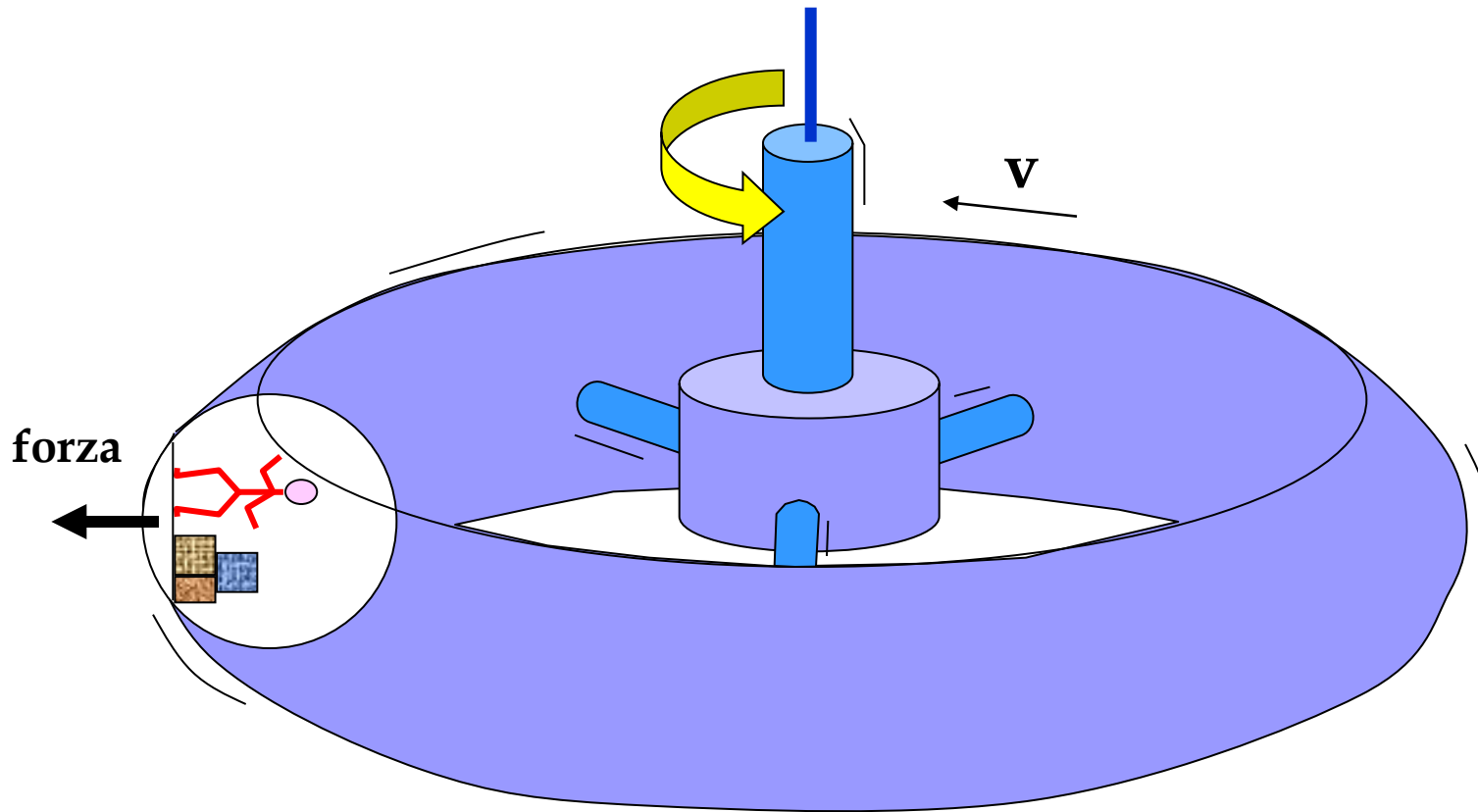
I corpi cadono insieme

(trascurando gli effetti dell'aria)



Esperimento fatto anche sulla Luna

Gravità e Accelerazione



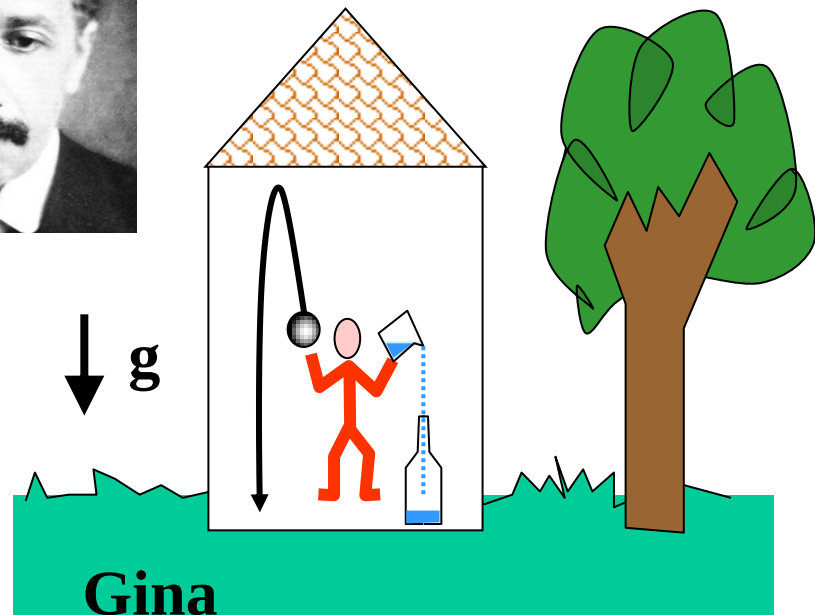
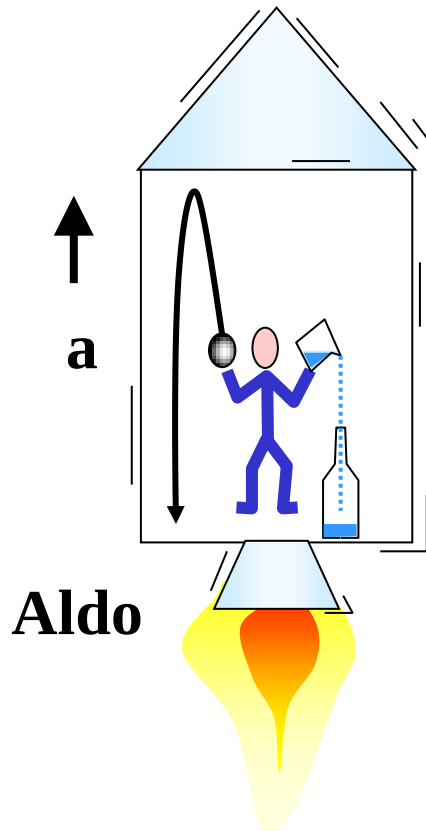
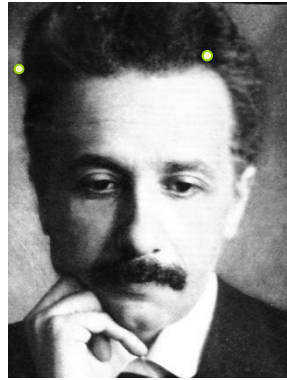
La forza centrifuga simula la gravità

Accelerazione o Gravità ?

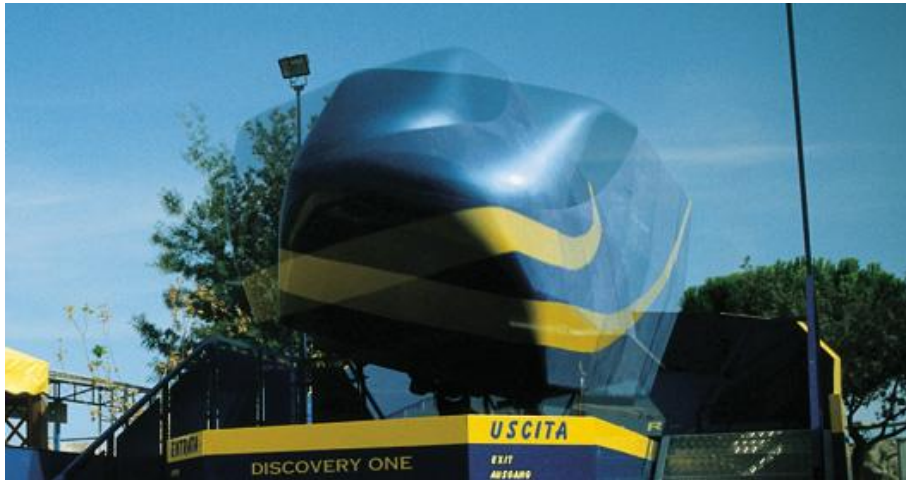
accelerazione?

1907 - 1916

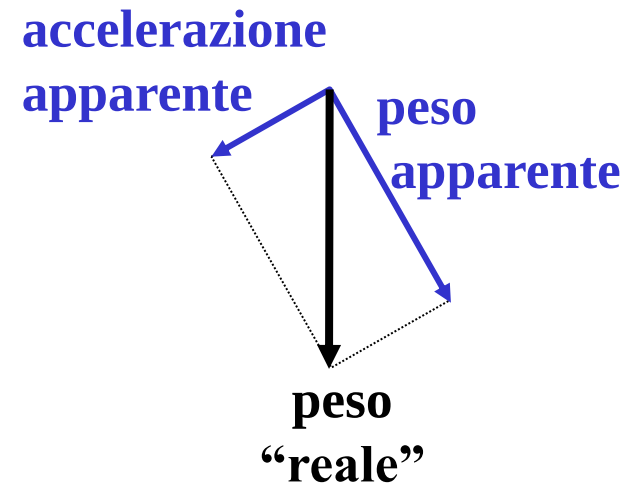
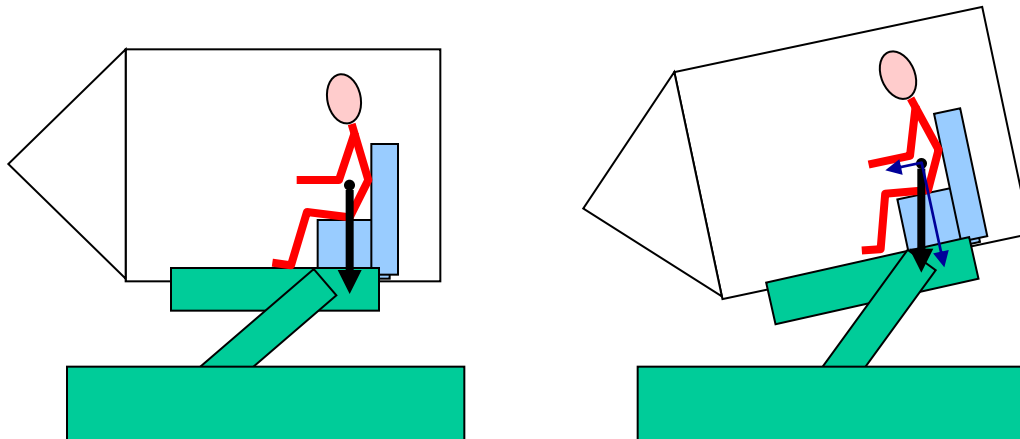
gravità?



Accelerazione è Gravità

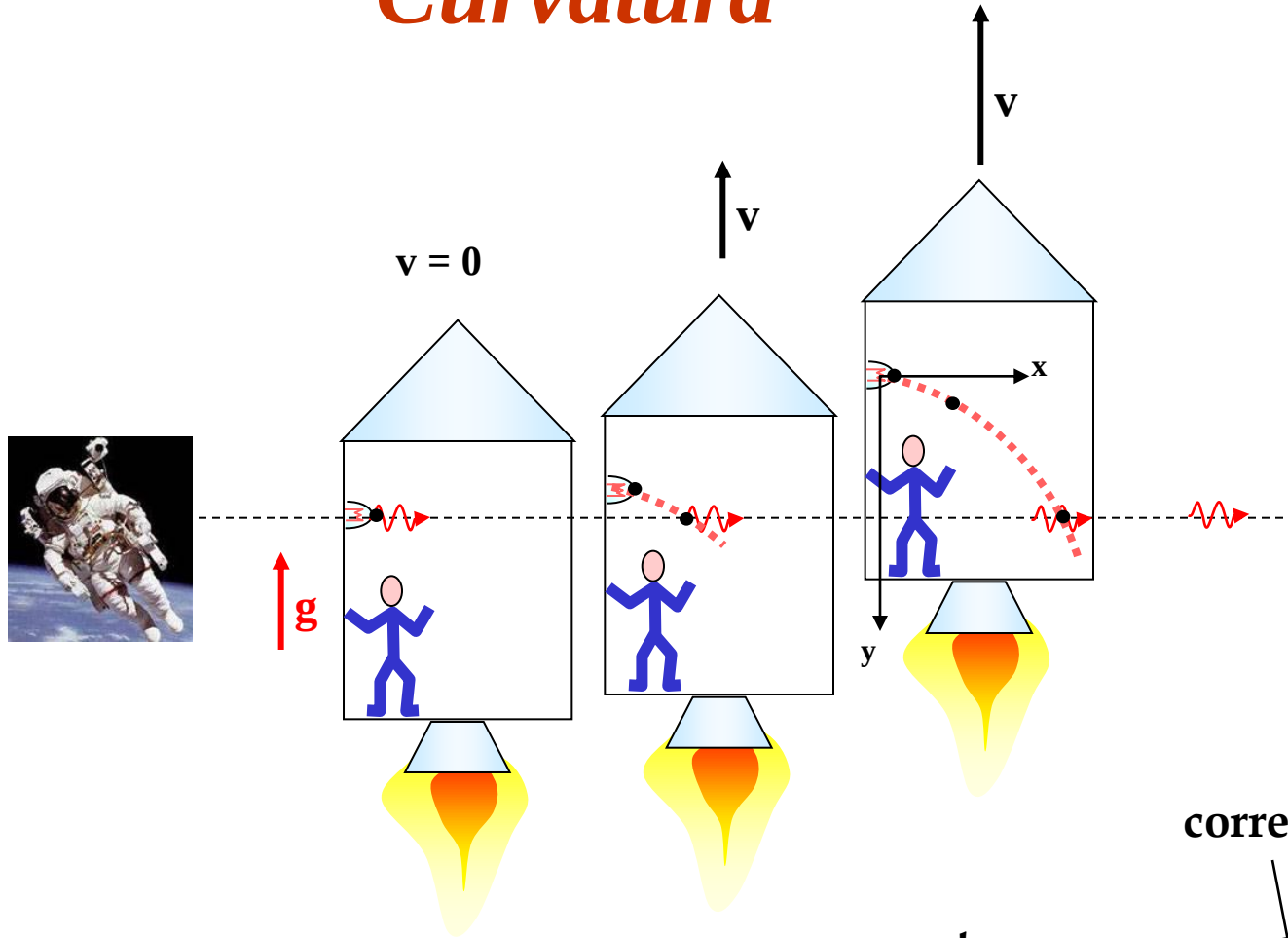


Simulatore da “Luna Park”



“sta frenando!”

Curvatura



$$x = c t$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

$$y = \frac{c^2}{2 a} x^2$$

$$y = R x^2 / 2$$

↑
raggio di curvatura

$$\Gamma = \frac{1}{R} = \frac{g}{c^2}$$

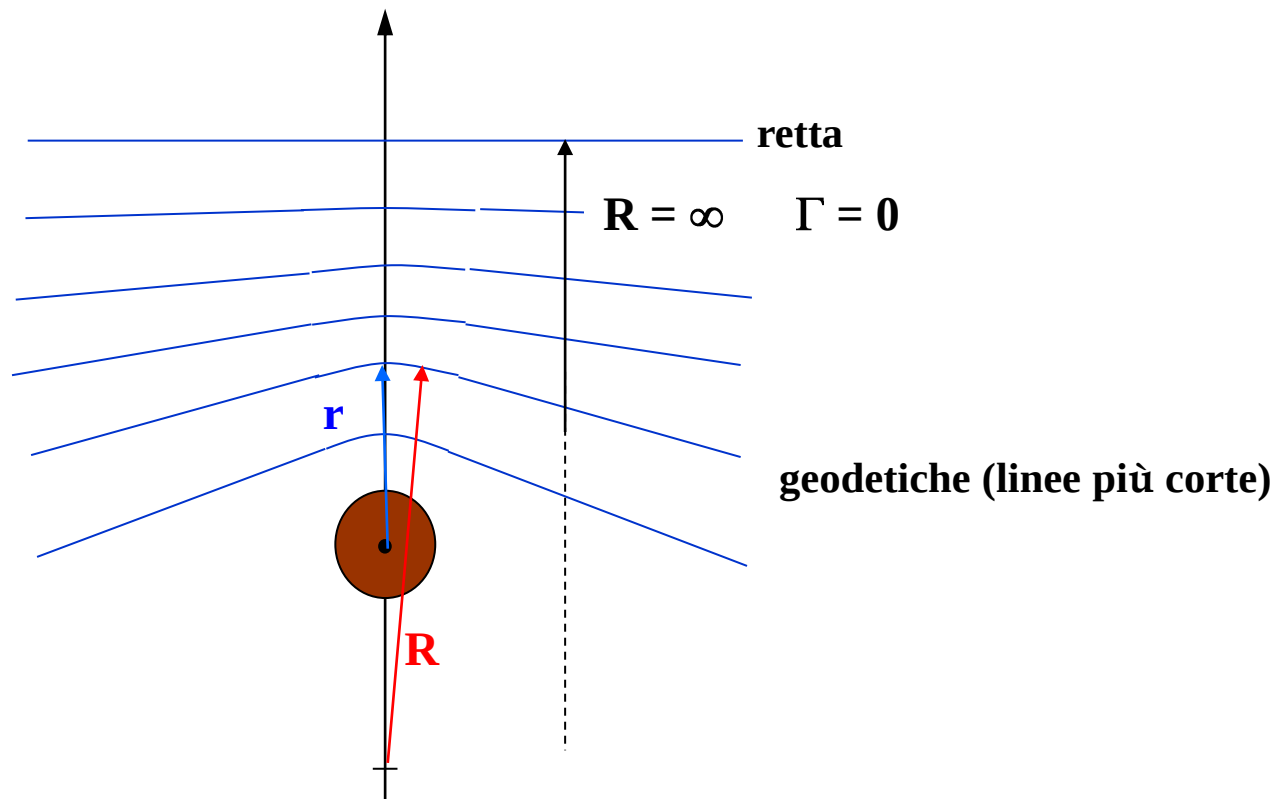
raggio di curvatura

curvatura

correzione

$$\Gamma = \frac{2 g}{c^2}$$

Geodetica



$$g = \frac{M G}{r^2}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^3/\text{s}^2\text{kg]}$$

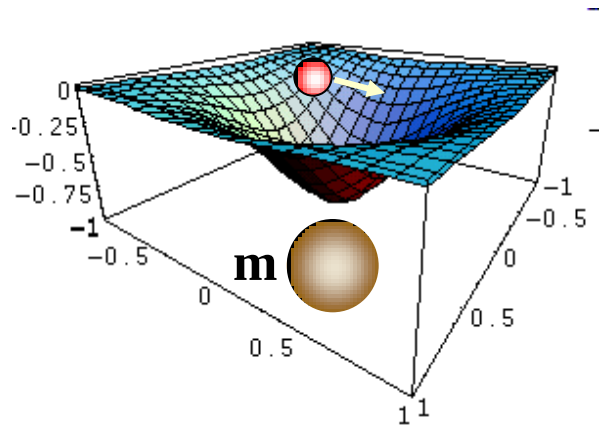
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$$

$$\Gamma = \frac{2g}{c^2}$$

curvatura

Relatività Generale

La massa curva lo spazio-tempo e genera la gravità
La gravità è un fatto geometrico

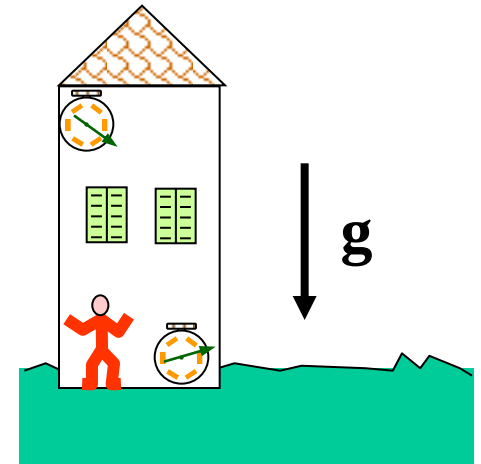


A. Einstein 1915

La geometrizzazione dello spazio
implica che in presenza di gravità:

- Contrazione degli spazi
- Dilatazione dei tempi
- Curvatura dei raggi di luce
-

$\pi < 3,14159..$



Spazio Curvo

geometria differenziale

$$ds^2 = \sum_1^4 g_{ij} dx_i dx_j \quad \text{metrica}$$

$$g = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{vmatrix}$$

$$dA^\alpha = d_j A^\alpha + \sum_1^4 \Gamma^\alpha_{j\beta} A^\beta dx_j$$

$$\Gamma(g_{ij})$$

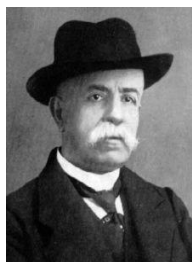
Elvin Christoffel



Bernhard Riemann

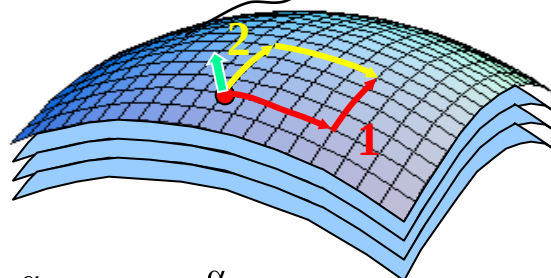
Gregorio

Ricci Curbastro



$$\frac{d^2 x^\alpha}{d\tau^2} = \sum_{\lambda\mu} \Gamma^\alpha_{\lambda\mu} \frac{dx^\lambda}{d\tau} \frac{dx^\mu}{d\tau}$$

geodetica



$$dA^\alpha_{1-2} = \sum_k R^\alpha_{ijk} A^k$$

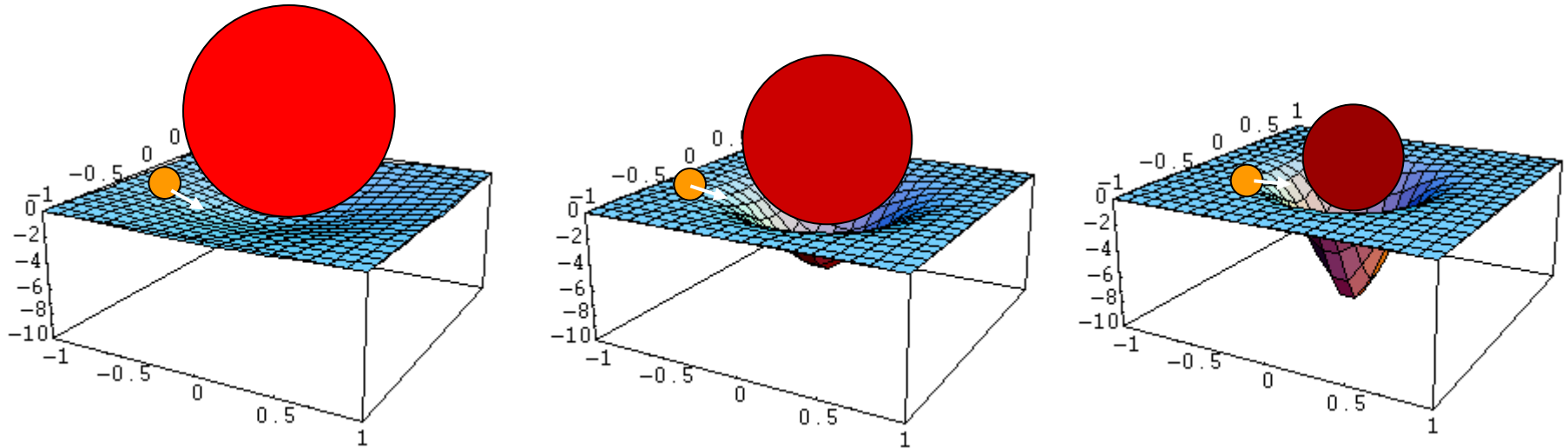
curvatura

$$R(\Gamma)$$

Tullio Levi Civita



Curvatura Spazio Tempo

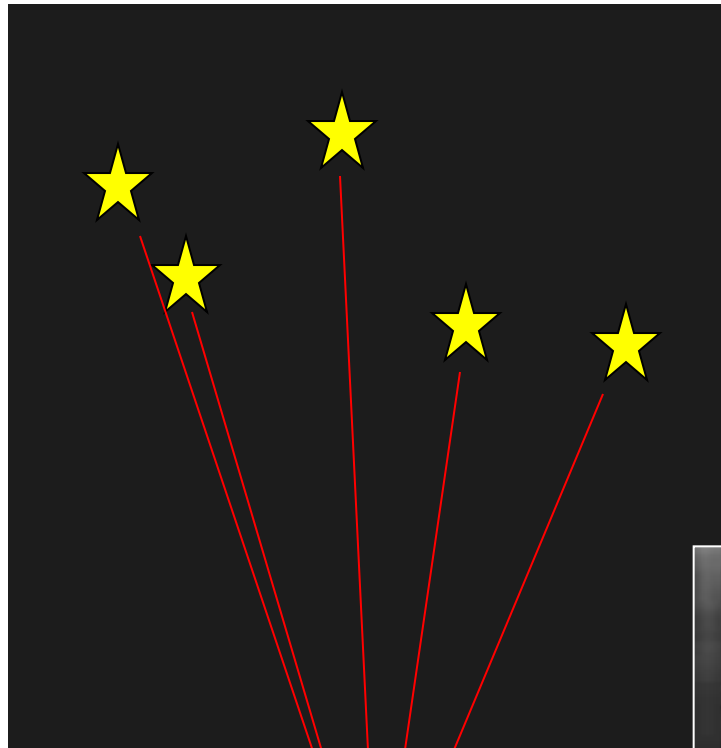


La materia curva lo Spazio

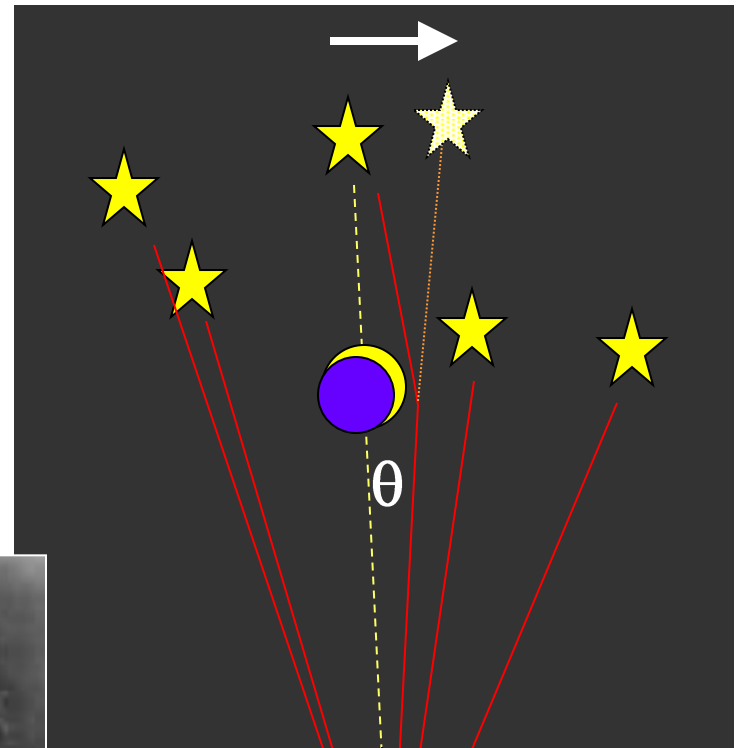
La curvatura dello Spazio indica alla Materia come muoversi

Verifica sperimentale

in eclisse



di notte

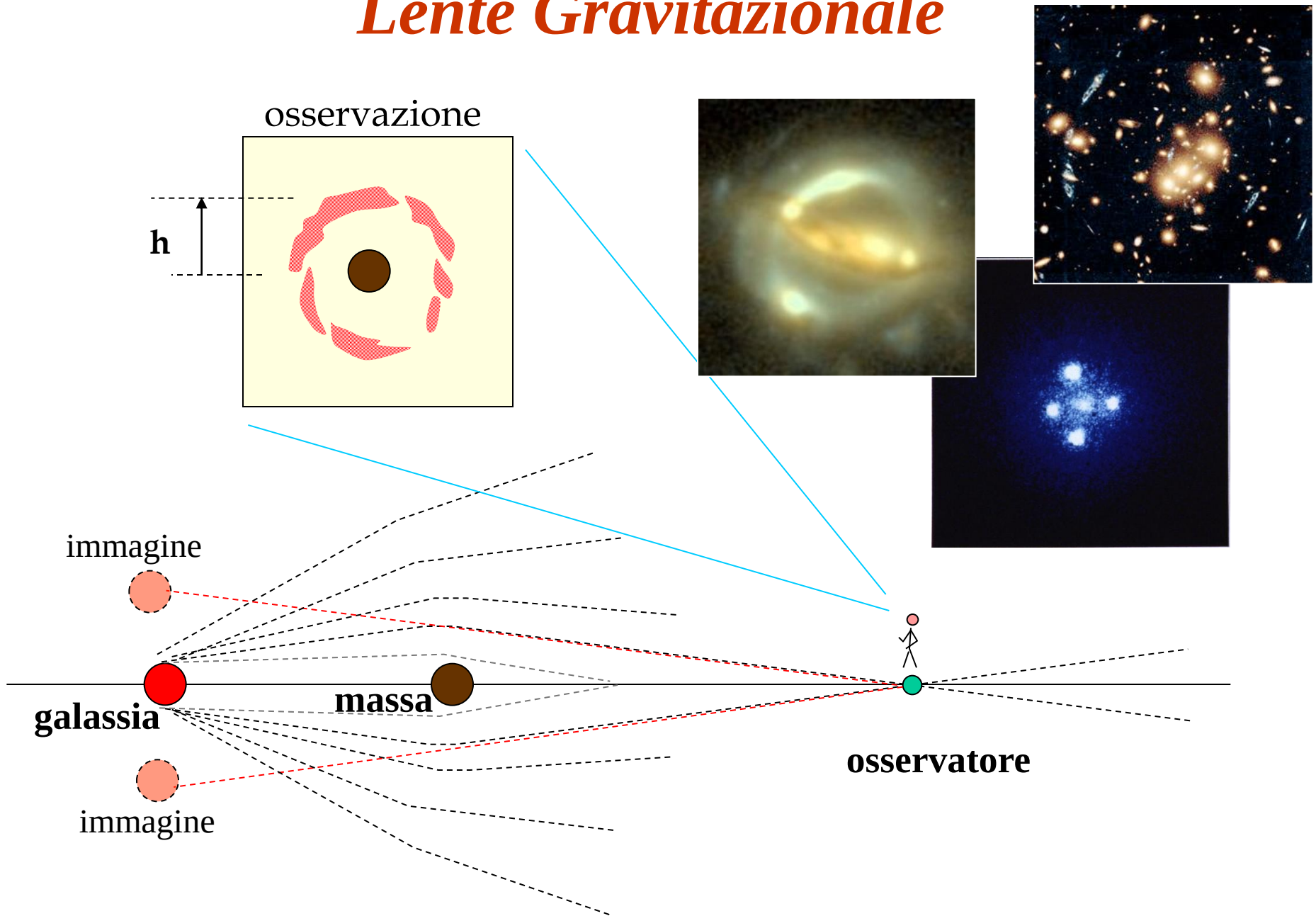


$\theta = 1.75''$



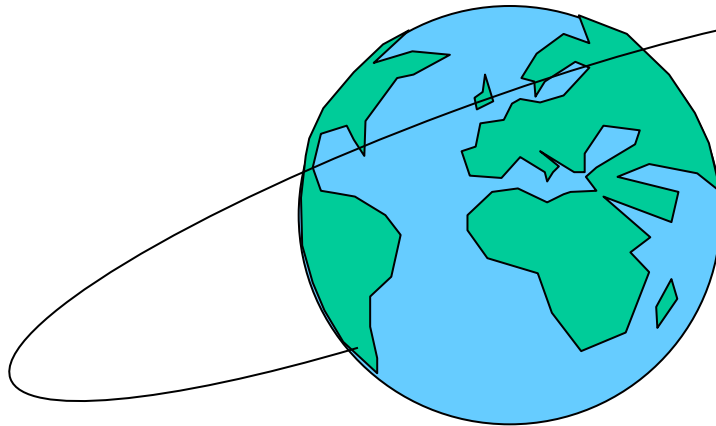
A. S. Eddington
29/ 05/1919
Brasile e Golfo di Guinea

Lente Gravitazionale



Stazione Spaziale

Mi sento invecchiata
di un milionesimo di
secondo in più di voi



6 mesi a ~ 400 km di altezza a velocità di 8 km/s

il GPS

Global **P**ositioning **S**ystem $\{x, y, z\}$ per i GPS commerciali
precisione: ~ 10 m

24 satelliti

$h = 20000$ km

$g = g_0 / 10$

$\Delta t = + 45 \mu s$

$v = 4$ km/s

$\Delta t = - 7 \mu s$

$\Delta t_{\text{tot}} = + 38 \mu s$ a giorno

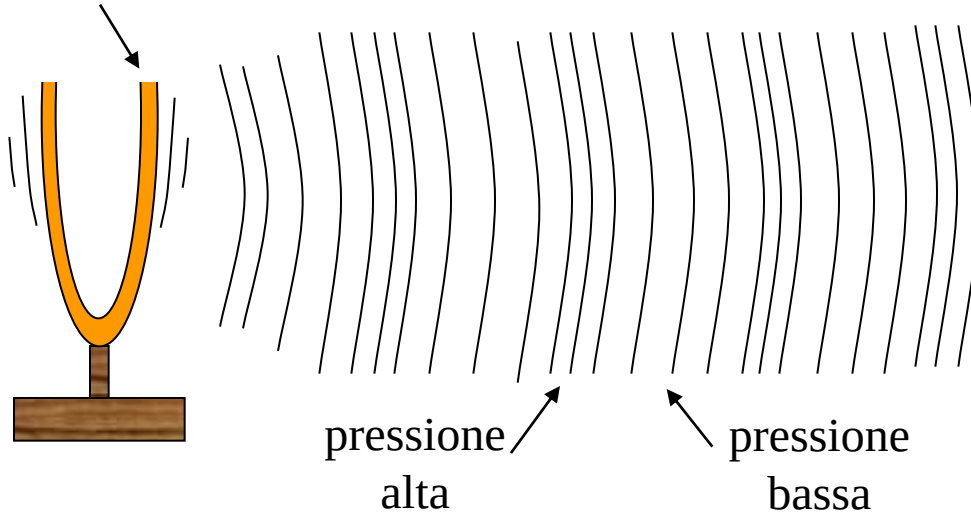
trascurandolo: errore 10 km/giorno



2 ONDE

Onde

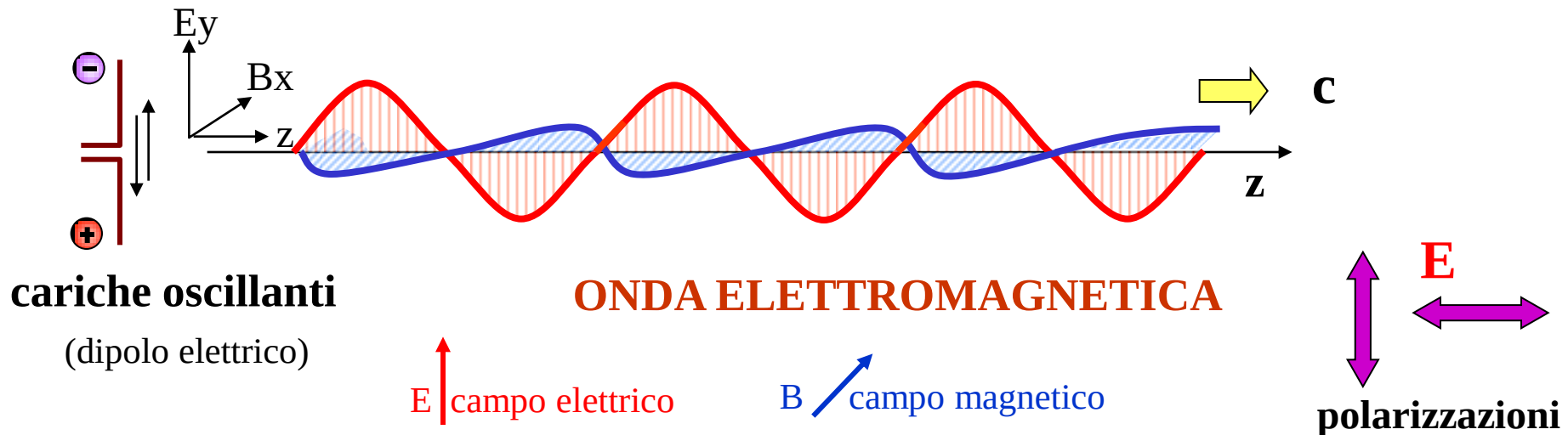
vibrazione di un rebbio



$$v = \sqrt{\frac{\text{pressione}}{\text{densità}}}$$

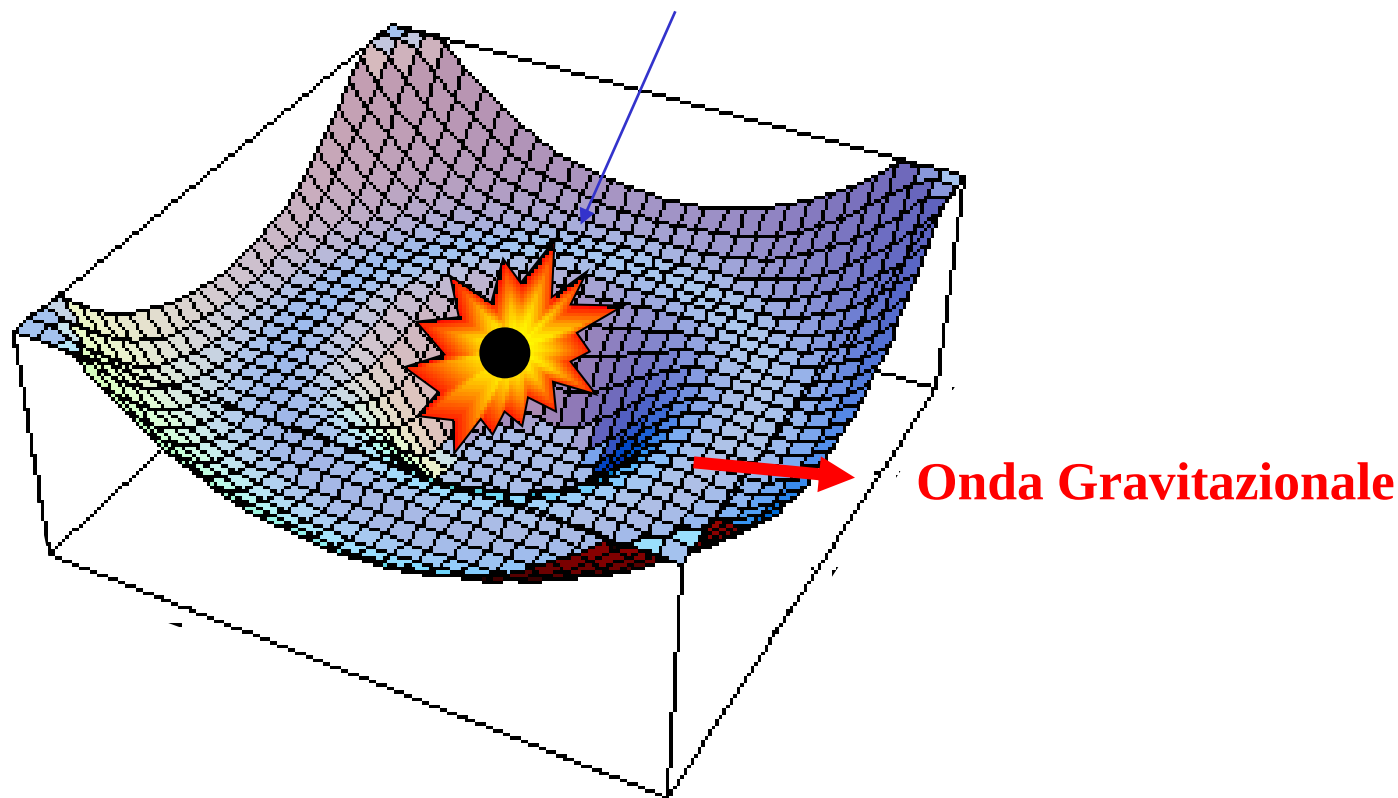
ONDA ACUSTICA

Le onde sono generate da accelerazione di forze



Onde Gravitazionali

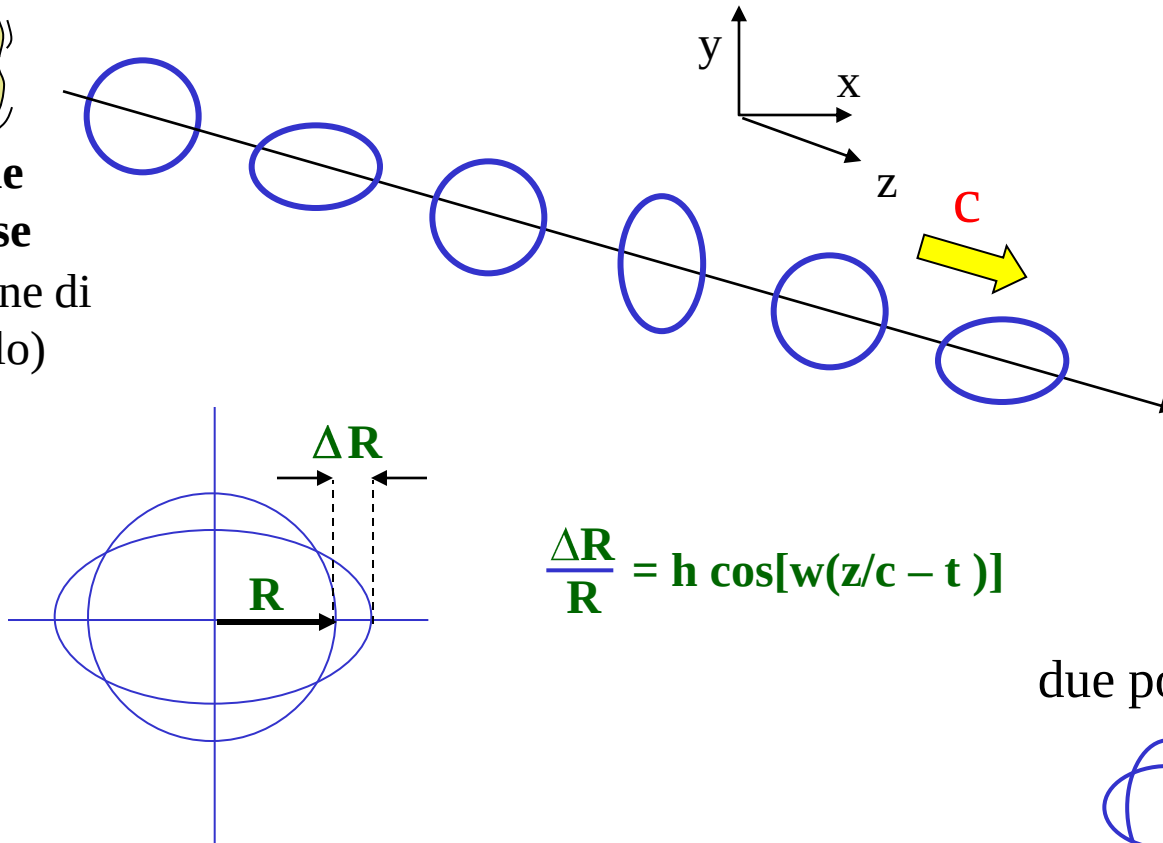
Esplosione o Collasso di grandi Masse



**L'accelerazione di grandi masse genera perturbazione dello spazio
“onde gravitazionali” che si propagano a velocità della luce**

Onda Gravitazionali

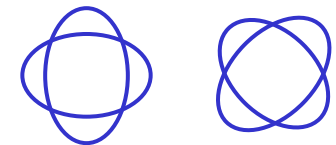
**vibrazione
delle masse**
(accelerazione di
quadrupolo)



$$\frac{\Delta R}{R} = h \cos[w(z/c - t)]$$

$$h = \frac{2 G \ddot{Q}}{R c^4}$$

due polarizzazioni



h_+

h_x

$$\ddot{Q} = \frac{d^2}{dt^2} \underbrace{M L^2}_{\text{quadrupolo}} \quad (\text{accelerazione di quadrupolo di massa})$$

$$h \sim 10^{-20}$$

$$f \sim \text{kHz}$$

Spazio Tempo

	ct	x	y	z
ct	-1	0	0	0
x	0	1	0	0
y	0	0	1	0
z	0	0	0	1

Spazio vuoto lontano da masse

Vicini a masse non troppo grosse

	ct	x	y	z
ct	-1+u	0	0	0
x	0	1	0	0
y	0	0	1	0
z	0	0	0	1

$$u = \frac{2 M G}{R c^2}$$

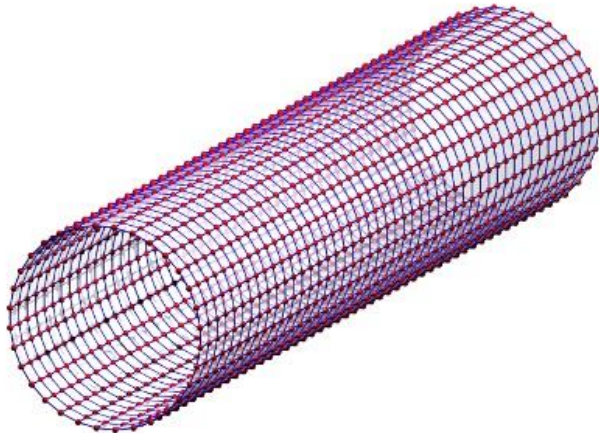
	ct	x	y	z
ct	-1	0	0	0
x	0	1+a	b	0
y	0	b	1-a	0
z	0	0	0	1

$$b = \frac{2 G \ddot{Q}}{R c^4}$$

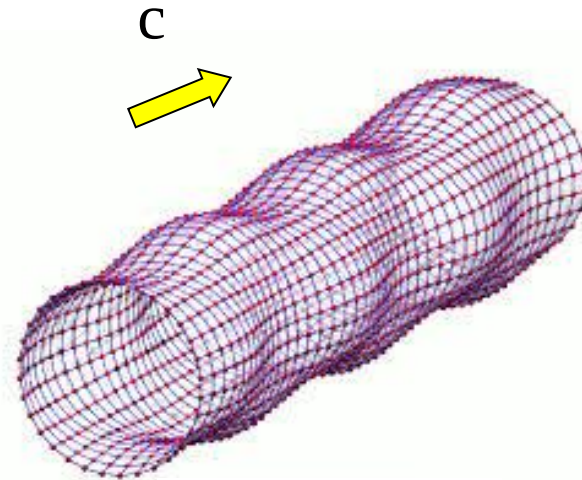
$$Q = M L^2 \text{ (quadrupolo)}$$

Spazio perturbato da una piccola onda gravitazionale: a e b diverse polarizzazioni

Onda Gravitazionale



spazio- tempo non perturbato

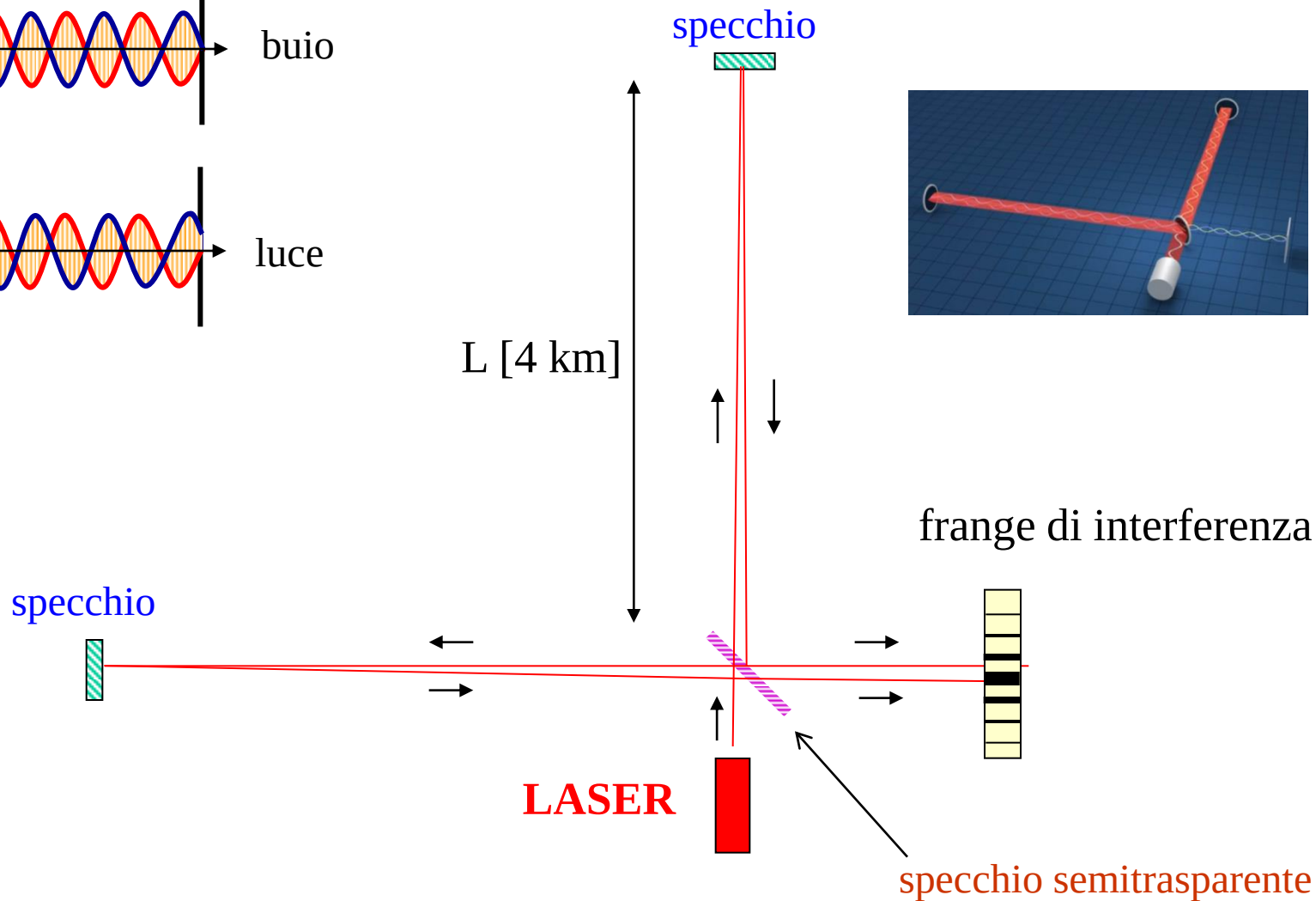
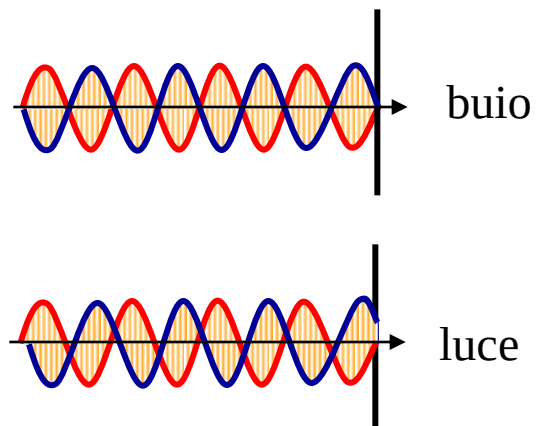


**onda gravitazionale
perturbazione dello spazio - tempo**

3 RIVELAZIONE

Interferometro

— da x
— da y



Rivelatori Onde Gravitazionali



VIRGO Cascine Pisa
laboratorio ricerca onde gravitazionali

Interferometro

LIGO Hanford Washington



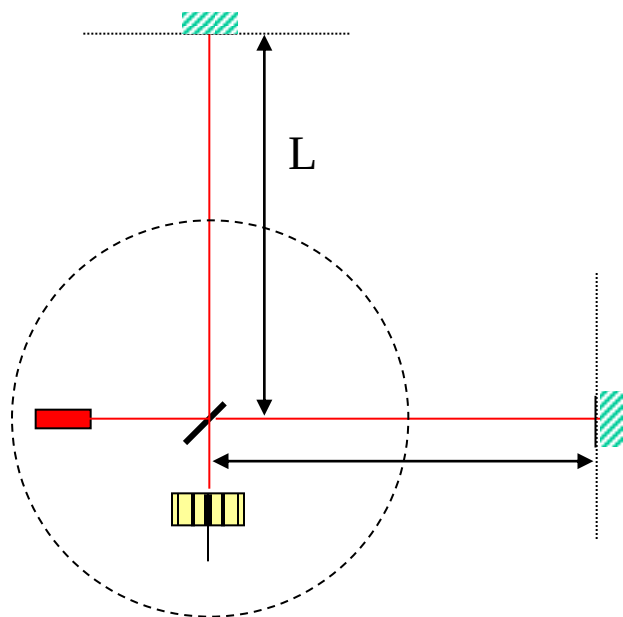
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory,

Interferometro

Ligo Livingston Louisiana

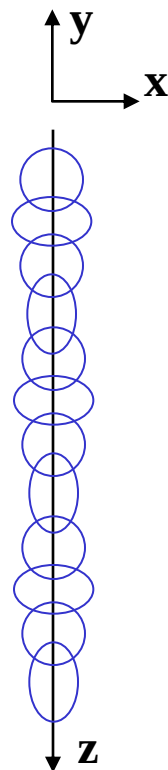


Misura



Non perturbazione

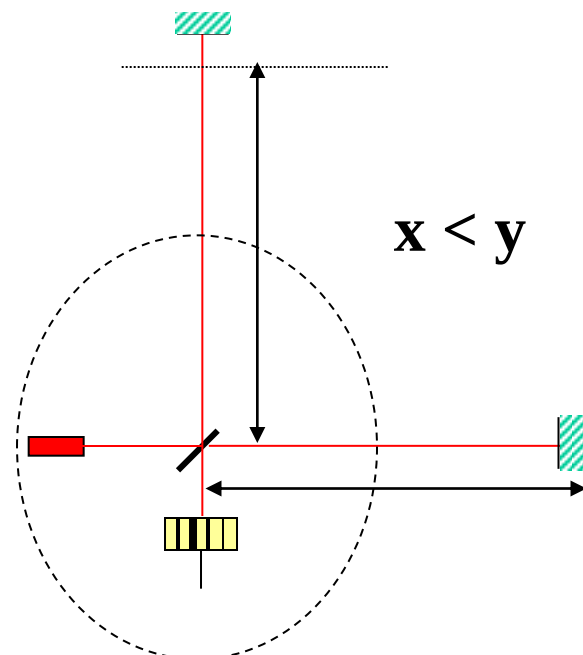
$$x = y$$



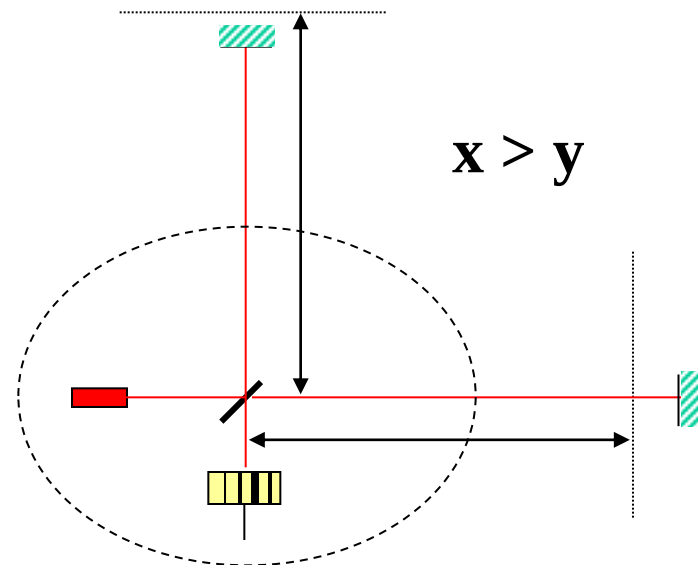
onda di
deformazione

$$f \sim 1 \text{ kHz}$$

$$h \sim 10^{-21}$$



perturbazione



Eccola!

14/09/2015 alle 10 50' 45" ora italiana

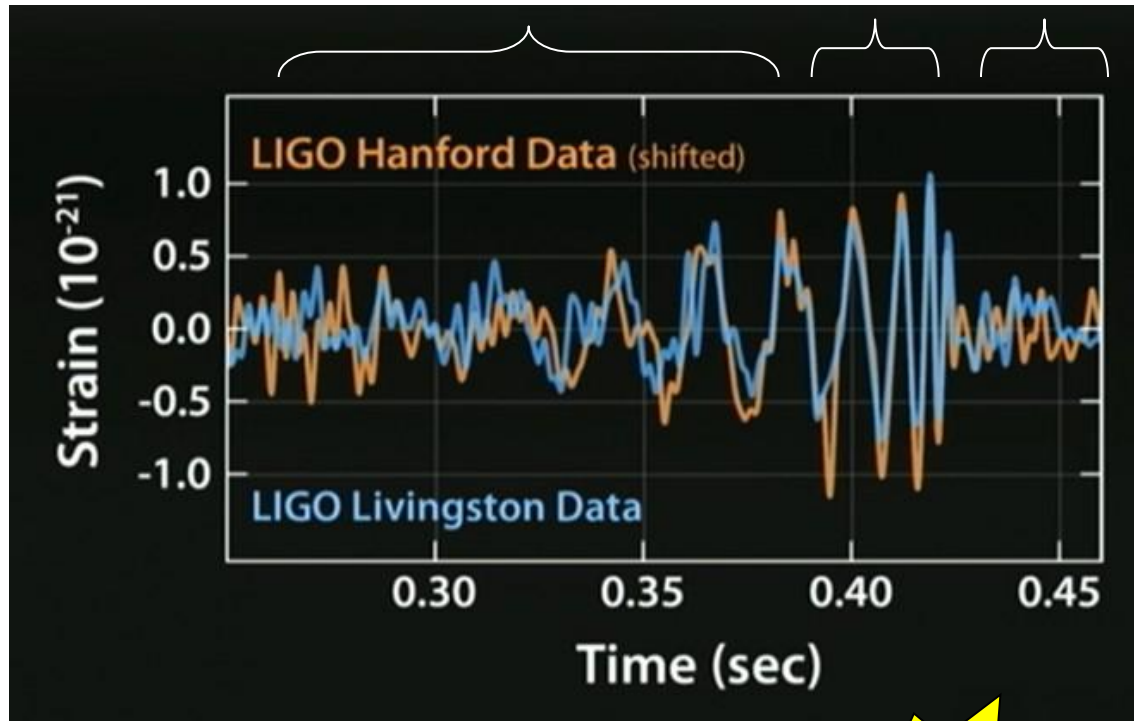
Annuncio ufficiale 11/02/2016

rotazione

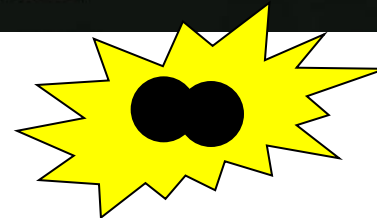
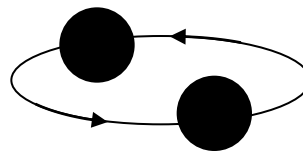
fusione

smorzamento

$$h = \frac{\Delta L}{L}$$



29 - 36 $M_{\odot}$



energia rilasciata come onde gravitazionali = 2 $M_{\odot}$

Triangolazione

onda gravitazionale

**Con più stazioni è possibile
triangolare e risolvere con
precisione da direzione di arrivo
dell'onda gravitazionale**

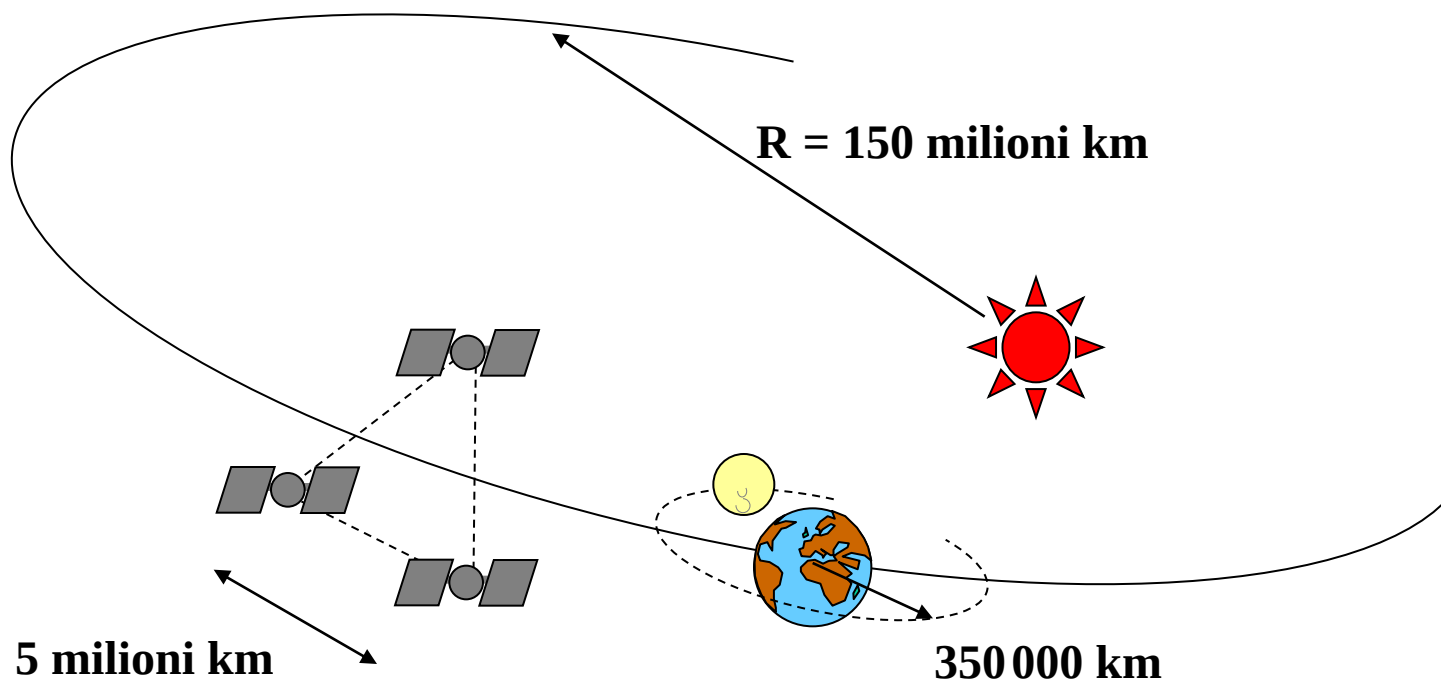
ritardo di ricezione



Programma Lisa

Laser Interferometer Space Antenna

Sviluppo in 10 anni



4 ANALISI CON ONDE GRAVITAZIONALI

Generazione di Onde Gravitazionali

Accelerazioni di grandi masse

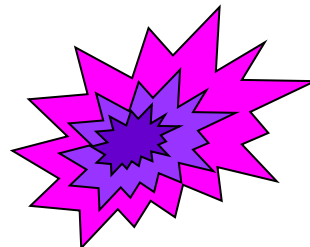
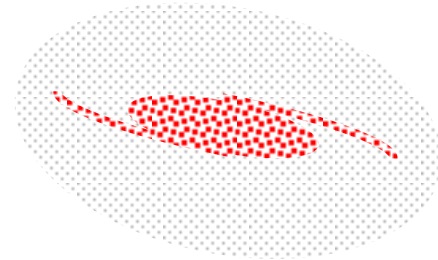
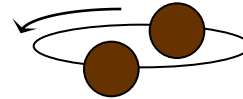
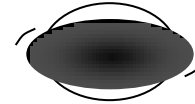
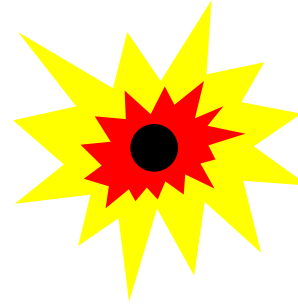
Esplosioni di supernova

Buchi neri in vibrazione

Sistemi binari massivi

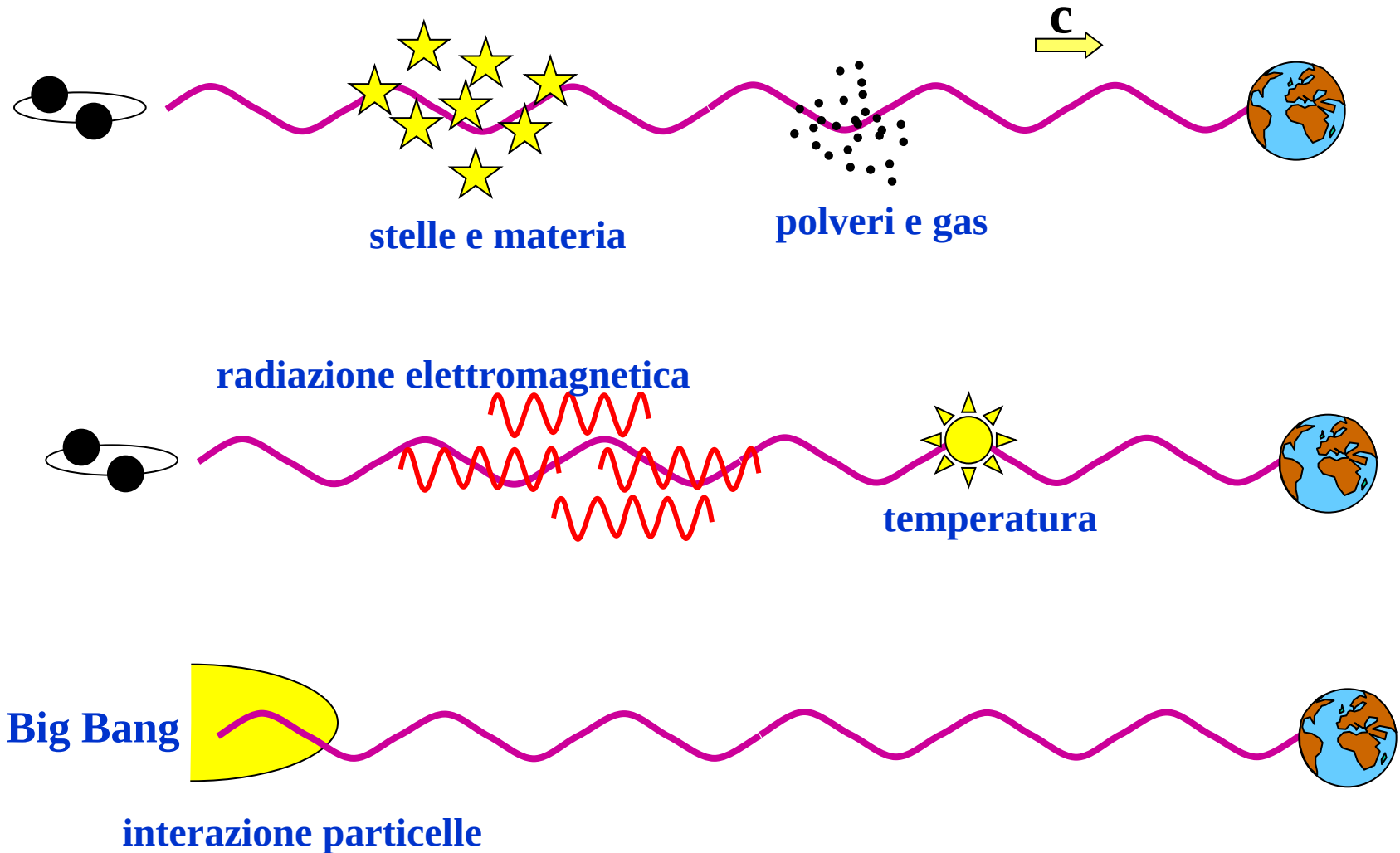
Galassie in formazione

Big Bang



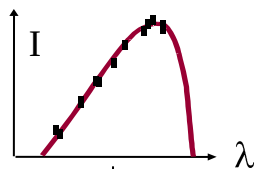
Sonda ad Onde Gravitazionali

Le Onde Gravitazionali non sono perturbate da altri fenomeni fisici



Big Bang

10000



la radiazione si raffredda

accensione
delle stelle

universo trasparente

R

4000

1000

l'Universo
diventa
buio

T

Plasma
opaco

0

0,1

0,2

0,3

0,4

0,5

0,6

0,7

0,8

0,9

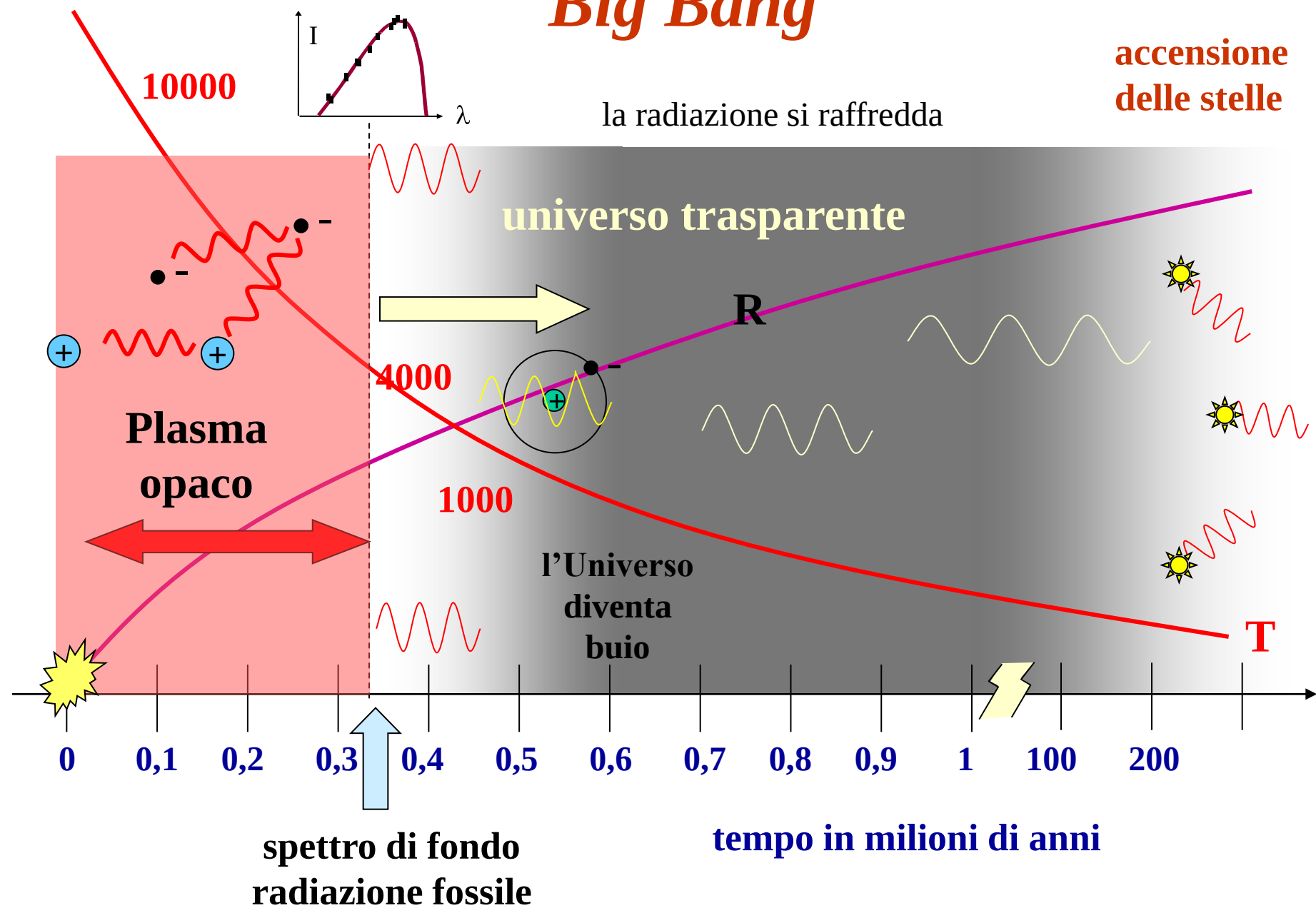
1

100

200

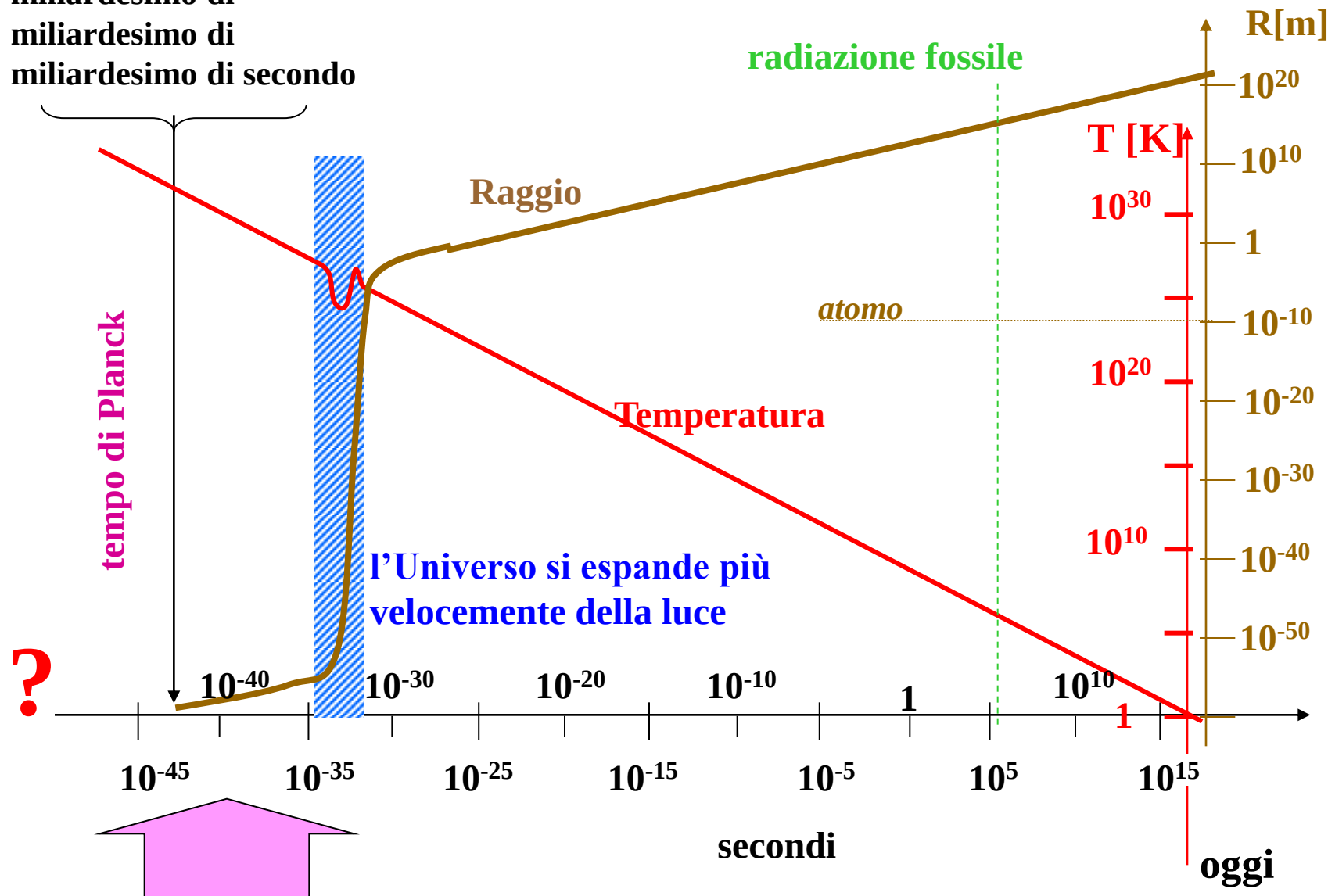
spettro di fondo
radiazione fossile

tempo in milioni di anni



un deci milionesimo di
miliardesimo di
miliardesimo di
miliardesimo di
miliardesimo di secondo

Inflazione



Occorre nuova teoria (Relatività + Meccanica Quantistica)

FINE

No! È solo l'inizio!

grazie per l'attenzione