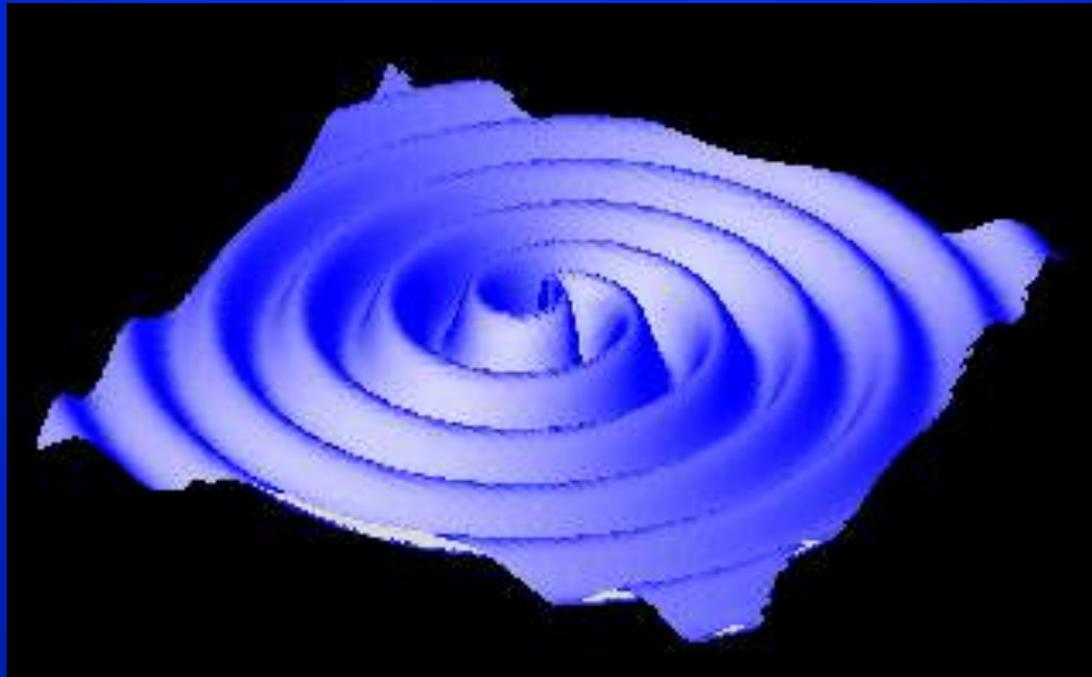


# Spazio e Tempo nell' Universo di Einstein



# Spazio e Tempo

Sono i concetti:

- Più elusivi
- Più interessanti
- Più utili nell'analisi scientifica dell'universo
  
- I primi ad essere modificati in modo radicale dall'arrivo di ogni nuova rivoluzione scientifica

# Cosa sono Spazio e Tempo?

- Esiste una differenza tra **spazio e materia**?
- Lo spazio esiste indipendentemente dalla presenza di oggetti materiali?
- Esiste lo **spazio vuoto**?
- Lo spazio è **finito o infinito**?

# Newton (1642-1727)

- I corpi possono muoversi ma cosa possiamo dire dell' ambiente in cui si verifica il moto?
- Lo spazio è un' entità fisica **reale o astratta?**



# Newton

- Le leggi del moto sono sempre le stesse in ogni sistema di **referimento inerziale**
- La velocità di un corpo rispetto ad un altro obbedisce alla **legge di composizione delle velocità**
- Le leggi del moto sono **invarianti** per trasformazioni di Galileo

Tutte le leggi della meccanica sono  
invarianti per trasformazioni di Galileo

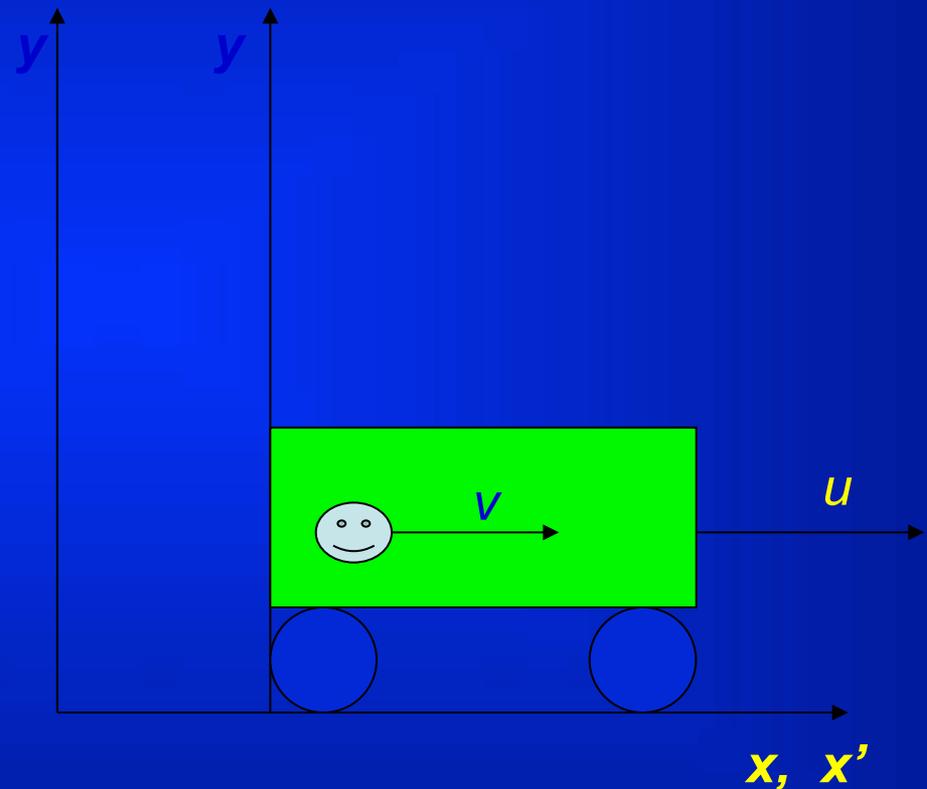
$$x' = x - ut$$

$$t' = t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$v' = u + v$$



# Lo Spazio e il Tempo di Newton

- Spazio e tempo sono entità **assolute e immobili**
- L' universo è un ambiente **rigido e inalterabile**
- Spazio e tempo sono un' armatura invisibile che dà **forma e struttura** all' universo

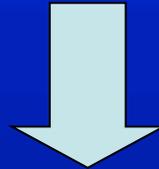
# Leibniz (1646-1716)

- Lo spazio non esiste
- Luogo in cui le cose sono relative le une alle altre
- In assenza di corpi lo spazio non ha significato o esistenza propri



# Newton vs Leibniz

- Se due corpi si muovono l'uno rispetto all'altro di moto rettilineo uniforme non si può distinguere il moto dalla quiete
- Se un corpo **accelera** sente l'effetto di una forza  
$$F = ma$$
- quindi riesce a capire che si sta muovendo rispetto a qualcosa



**SPAZIO ASSOLUTO**

# Mach (1838 – 1916)

- Non esiste alcun tipo di moto se non ci sono parametri di riferimento
- Spazio: linguaggio che esprime le relazioni tra le posizioni degli oggetti

Non ha esistenza propria

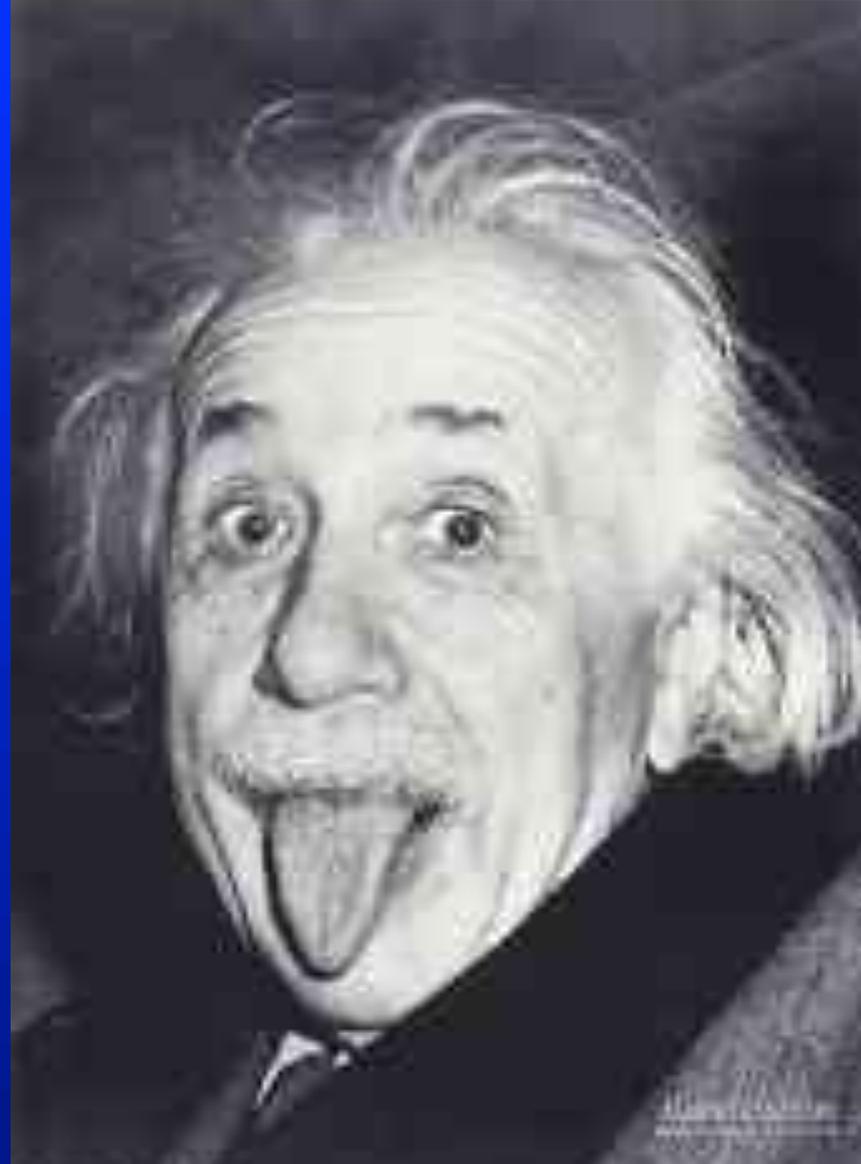
**ACCELERAZIONE = MATERIA**

La forza che sentiamo è proporzionale alla quantità di materia

# Einstein (1879-1955)

- Rivoluzione nei concetti di Spazio e di Tempo
- Spazio e tempo sono intrecciati
- La domanda diventa:

CHE COS' E' LO  
SPAZIOTEMPO?



# La fisica fondamentale a fine '800:

## Fisica classica:

- Meccanica
- Termodinamica
- Gravitazione newtoniana
- Elettromagnetismo (Maxwell)

# La luce

- **Sintesi di Maxwell**: fenomeni elettrici e magnetici sono le due facce della stessa medaglia
- Il **campo elettromagnetico** si propaga nello spazio come un'onda ad una velocità che corrisponde alla **velocità della luce**
- La luce è un'onda elettromagnetica

# A quale velocità si muove la luce?

$$C = 300.000 \text{ Km/s}$$

La luce **non obbedisce** alla legge classica di composizione delle velocità

Le equazioni di Maxwell sono **invarianti** per trasformazioni di Lorentz

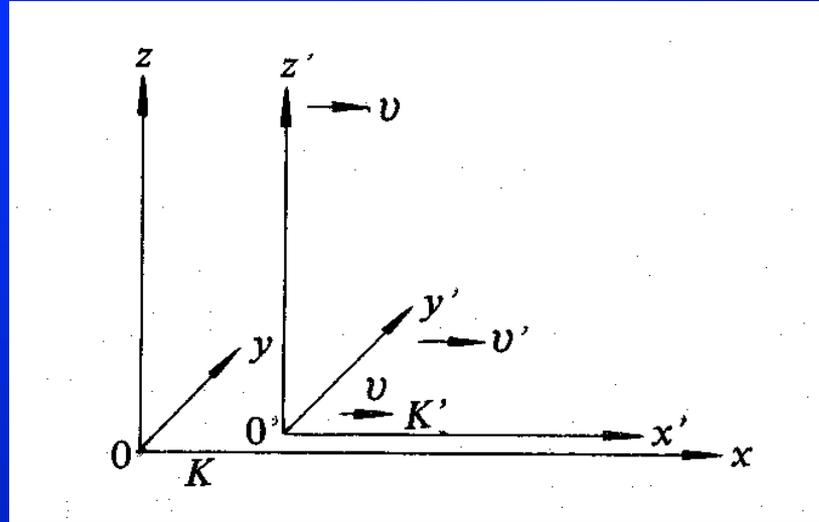
# Trasformazioni di Lorentz

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



- Nel limite di  $c$  tendente ad infinito si riducono alle trasformazioni della meccanica classica
- Nuova legge di composizione delle velocità

$$V = \frac{V' + v}{1 + \frac{V'v}{c^2}}$$

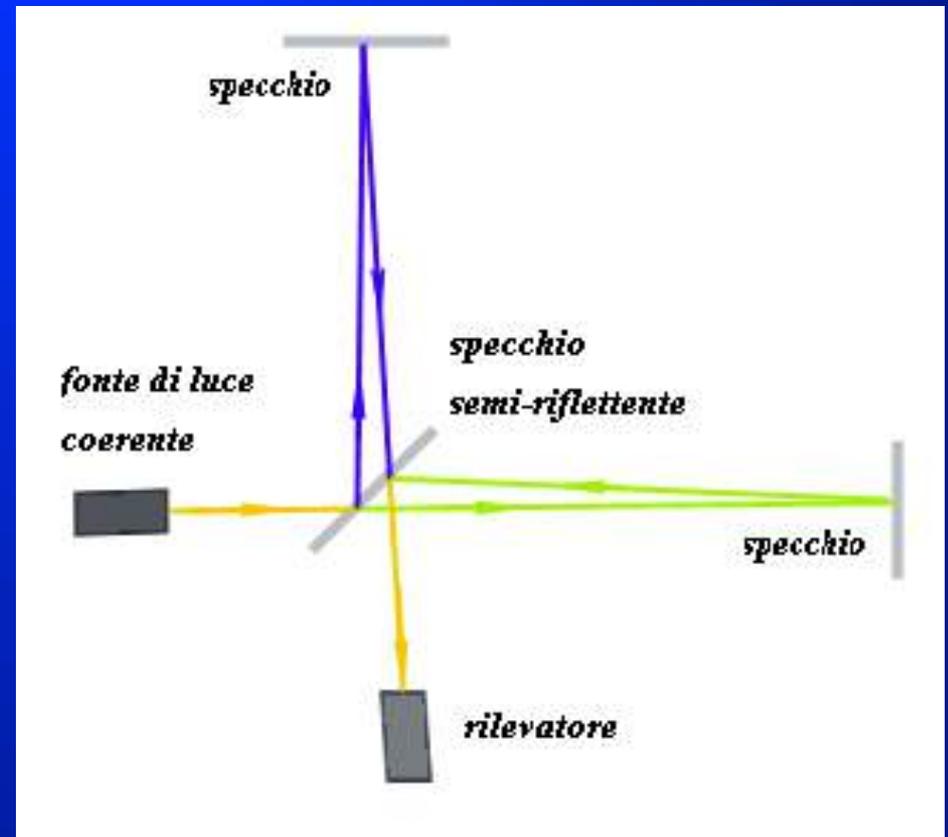
# Conseguenze

Le equazioni di Maxwell sono **invarianti**  
per trasformazioni di Lorentz

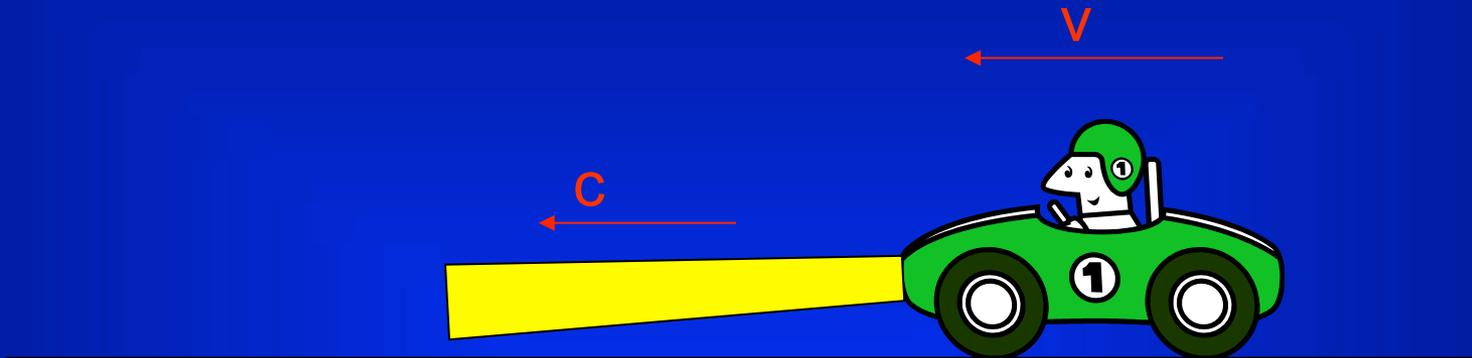
La velocità della luce è sempre costante

# Costante rispetto a cosa?

- Ipotesi dell' esistenza dell' **etere**
- 1887 esperimento di Michelson-Morley



**c = costante sempre**



$$v' \neq c + v$$

$$v' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \frac{c + v}{\frac{c + v}{c}} = c$$

$$c = 300.000 \text{ Km/s}$$

in qualunque sistema di riferimento

# Punti di partenza per una nuova teoria

- L'etere non esiste
- La luce non può stare ferma
- La luce non ha bisogno di un mezzo per propagarsi

**Devono cambiare i concetti di  
Spazio e Tempo**

# La teoria della Relatività Speciale

Einstein “Sull'elettrodinamica degli oggetti in movimento” (1905):

- le leggi della natura sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali  
(principio di relatività)
- La velocità della luce nel vuoto e' costante, indipendentemente dal moto della sorgente luminosa (costanza della velocità della luce)

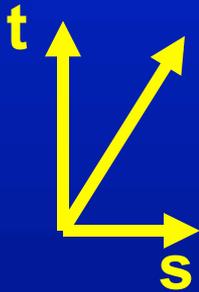
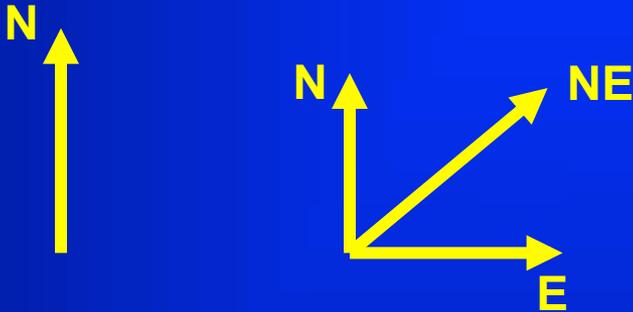
# Come fa la luce a comportarsi in questo strano modo?

Velocità = spazio/tempo

La percezione di spazio e di tempo deve essere diversa a seconda dell'osservatore

Velocità = spazio relativo/tempo relativo

I corpi non si muovono solo nello spazio ma anche nel tempo



Spazio e Tempo sono strettamente correlati



Se un oggetto è **fermo** significa che non si muove nello spazio, ma che compie tutto il suo **moto nel tempo**



La velocità nel **tempo rallenta** quando una parte del moto totale è impiegata per compiere il **moto nello spazio**

# Effetti della relatività speciale

- La velocità combinata del moto di un corpo nello spazio e nel tempo è sempre esattamente uguale alla velocità della luce
- Il moto nello spazio e nel tempo sono complementari
- Nello spazio solo la luce viaggia a 300.000 Km/s
- Per la luce il tempo non scorre

# Effetti della relatività speciale

Gli oggetti che si muovono a velocità prossima alla velocità della luce subiscono

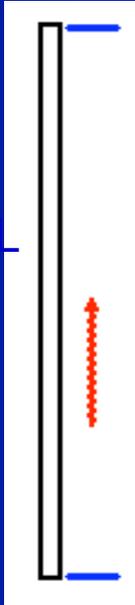
Contrazione delle  
Lunghezze

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Dilatazione dei tempi

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

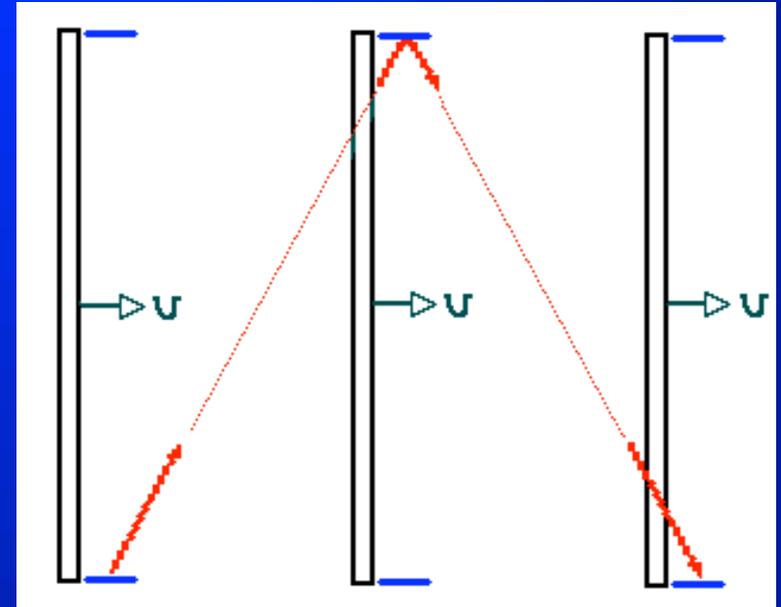
# Orologio a fotoni



Ogni volta che la luce va su e giù riflessa dagli specchi è un TIC

Sistema a riposo

$$\Delta t = L/c$$



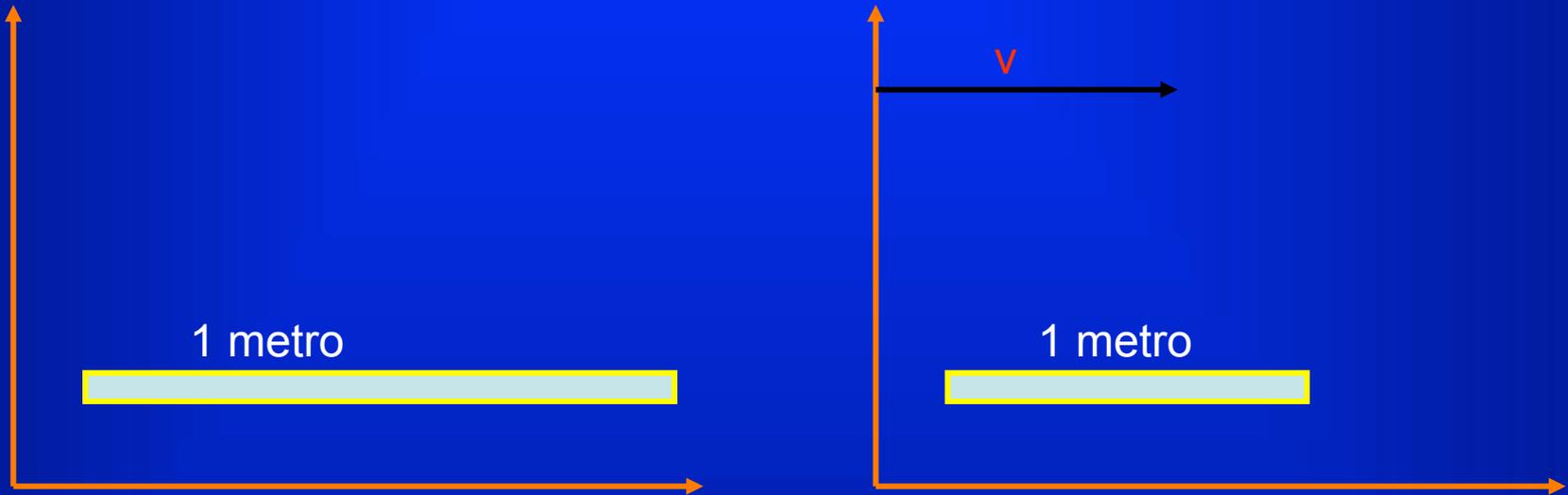
Sistema in moto

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Dilatazione dei tempi

- Un qualunque orologio in **movimento** appare più **lento** ad un **osservatore fermo**
- La durata di un fenomeno misurata in un sistema di riferimento solidale con esso si chiama **intervallo di tempo proprio**

# Contrazione delle lunghezze



La lunghezza del righello sarà **minore** per un **osservatore fermo**

Nel sistema solidale al righello la lunghezza non cambia

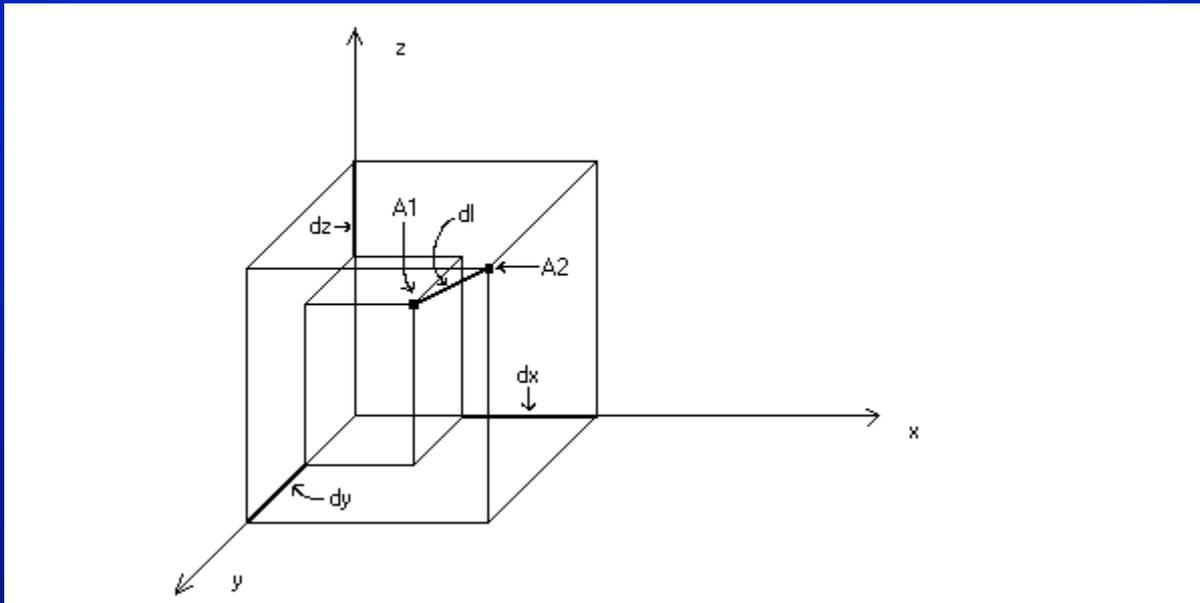
# Conseguenze

- Non esiste un sistema di riferimento privilegiato
- Distanze nello spazio, durata nel tempo sono relativi

**Lo Spaziotempo è assoluto**

# Distanza in spazio 3D

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2$$



# Distanza in spazio 4D

$$(ds)^2 = (cdt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2$$

**La metrica è invariante**

# Dilatazione dei tempi

Vita media del muone =  $1,5 \mu\text{s}$

Distanza che potrebbero percorrere =  $0,5 \text{ Km}$

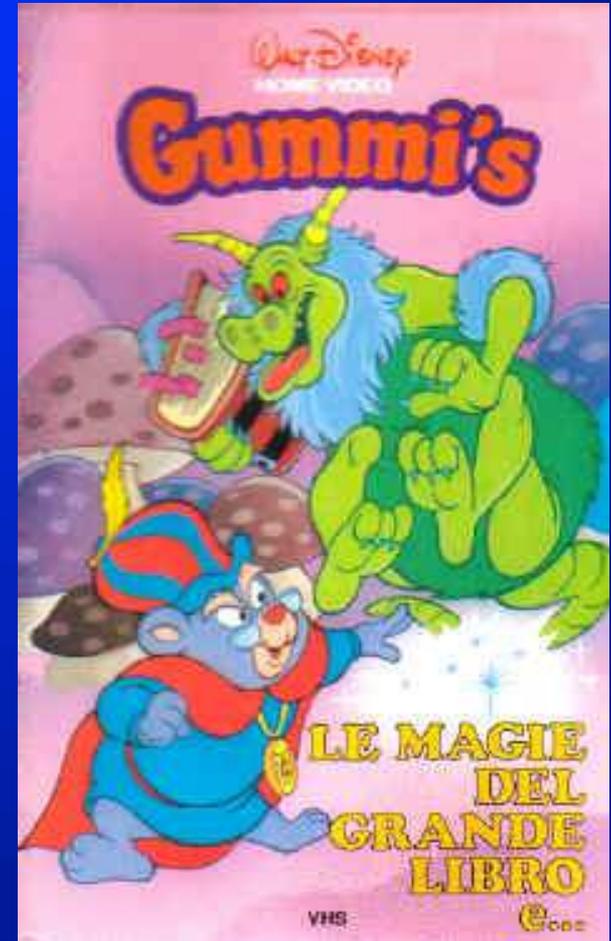
Distanza percorsa dai muoni cosmici =  $15 \text{ Km}$

Vita media del muone diventa =  $47 \mu\text{s}$



# Come suddividere lo spazio e il tempo?

- Ogni pagina del libro cartone rappresenta un **evento** in un **istante** dello **spaziotempo**
- Una suddivisione differente dà rappresentazioni diverse



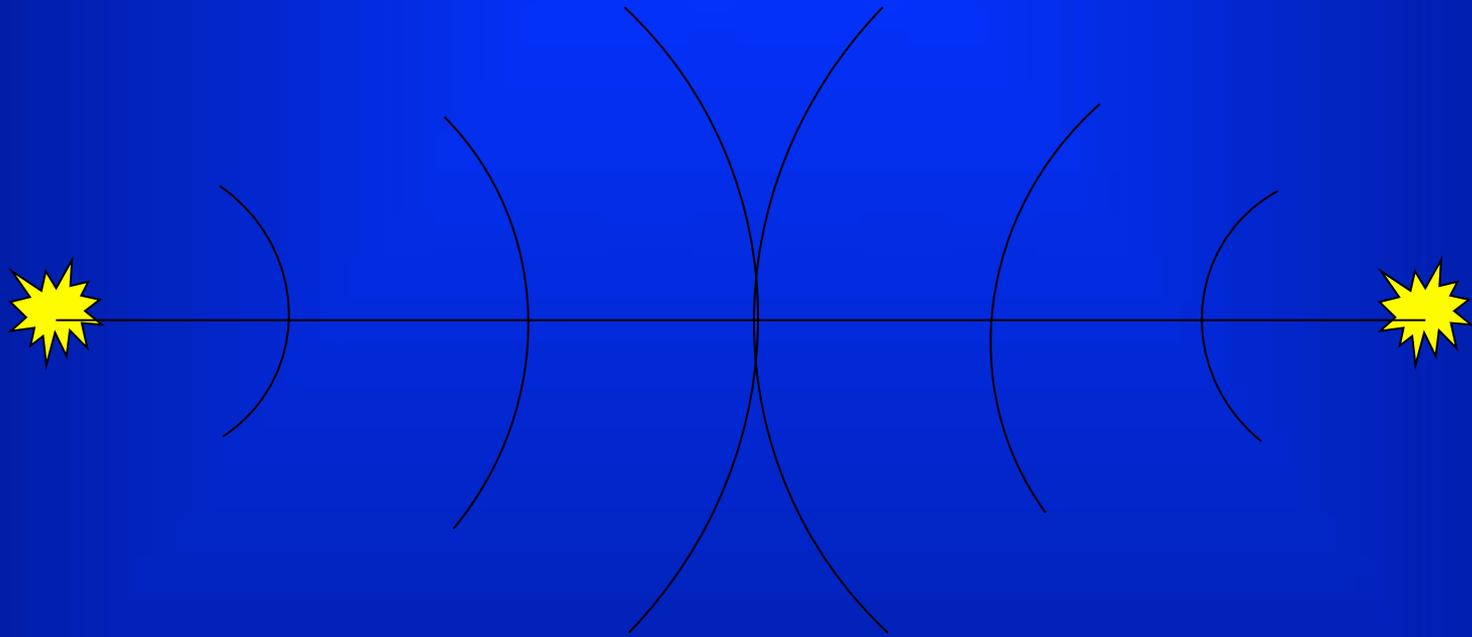
- Un blocco spaziotemporale viene tagliato in fette temporali ad angoli diversi da osservatori in moto relativo



- Quanto più è elevata la velocità, tanto maggiore è l'angolo

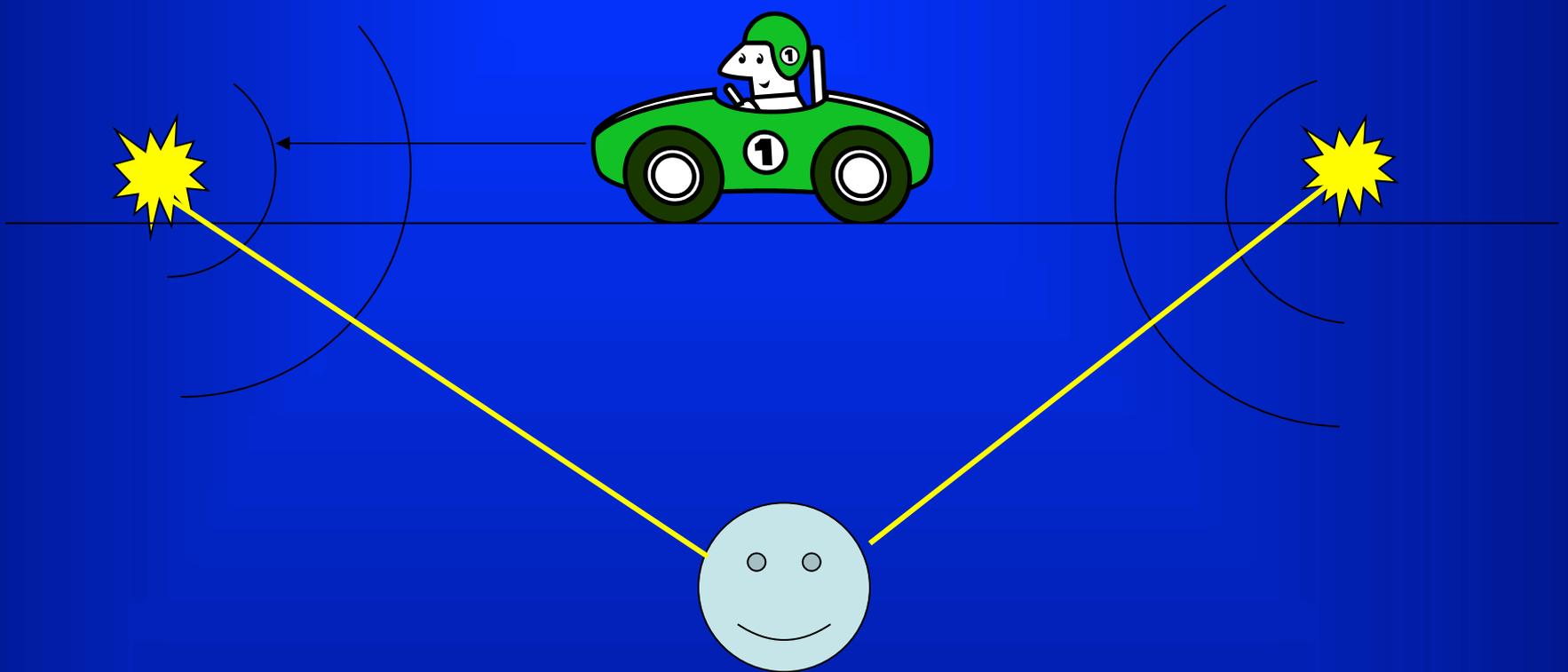
$$(v = c \longrightarrow \alpha = 45^\circ)$$

# Simultaneità



I due eventi sono **simultanei** se la luce che emettono giunge nello stesso istante in un punto equidistante

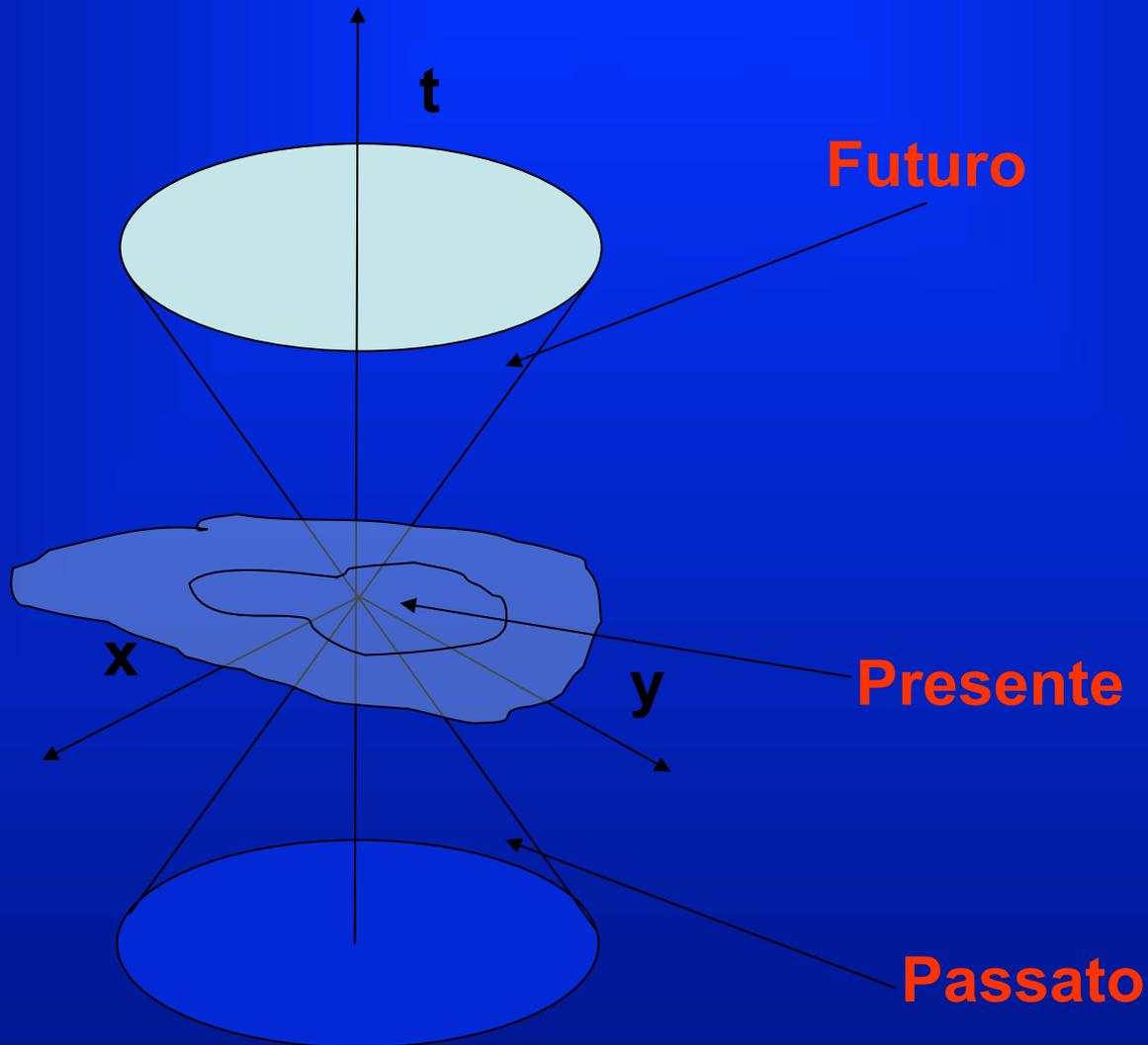
# Relatività della simultaneità



I segnali luminosi arrivano **simultaneamente per Sig. Smile** ma non per il **Sig. Smith** che nel frattempo si muove verso una delle due sorgenti

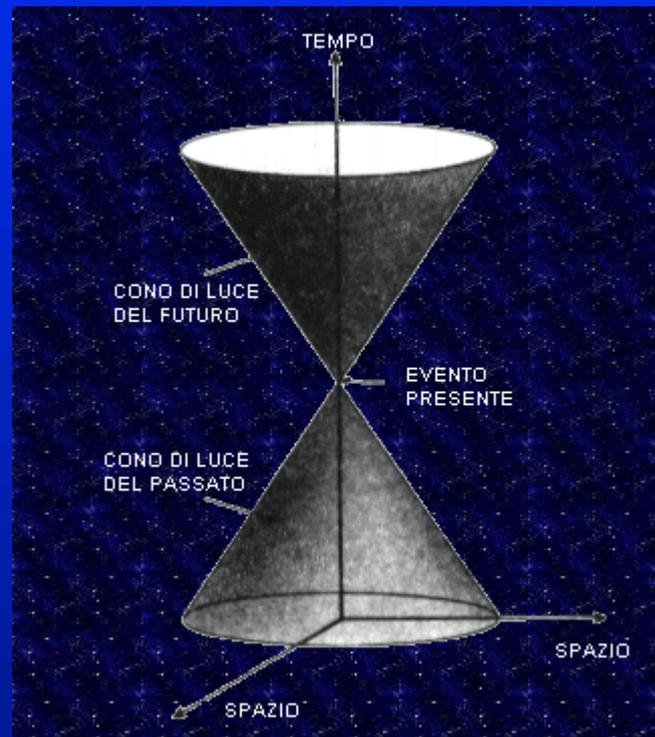
- Due osservatori diversi possono vedere una diversa successione dei due eventi ma solo per distanze più grandi di quelle percorribili dalla luce in quell'intervallo di tempo
- **La causalità è salva**
- In nessun sistema di riferimento si vede lo sparo del cacciatore dopo la morte della selvaggina
- Se questo accadesse significherebbe che le informazioni viaggerebbero ad una velocità maggiore di quella della luce

# Il cono di luce



# Lo spaziotempo

Sistema di riferimento 4-dimensionale



# Compatibilità delle leggi della dinamica con i nuovi risultati

- **Prima legge:** non è in contraddizione perché contiene in **principio di relatività** dei sistemi inerziali
- **Seconda legge:** incompatibile con la costanza della velocità della luce
- **Terza legge:** le due azioni non possono essere istantanee perché si propagano a velocità finita, **le forze di azione e reazione non è detto che siano uguali**

# Dinamica relativistica

$$E = \gamma m_0 c^2$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = mc^2$$

A causa dell'equivalenza di **energia e massa**, l'energia che un oggetto ha in conseguenza del suo movimento andrà a sommarsi alla sua massa e sarà quindi difficile che aumenti la velocità.

Nessun oggetto potrà mai raggiungere la velocità della luce perché a quella velocità la sua massa diventerebbe infinita e ciò richiederebbe una quantità di energia infinita.

# Conclusioni

La relatività ristretta fa parte dei principi generali della fisica fondamentale.

Ci ha insegnato che la velocità della luce è uguale in tutti i sistemi di riferimento e che nessun segnale o interazione può propagarsi più velocemente.

Per conseguenza il tempo non è assoluto e la massa non si conserva, ma può mutarsi in altre forme di energia.

Le applicazioni e le verifiche della relatività sono molto comuni: reattori nucleari, interazioni tra particelle elementari, ingegneria degli acceleratori

# Moti accelerati

- Lo spaziotempo è il riferimento per capire se i moti sono accelerati oppure no
- Una **traiettoria curva** nello spaziotempo rappresenta un **moto accelerato**

# Meccanica Newtoniana

Legge di gravitazione universale

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gravità = azione a distanza istantanea

Il concetto di azione istantanea è in disaccordo con la teoria della relatività speciale perché nulla può viaggiare ad una velocità maggiore della velocità della luce

# Equivalenza tra gravità e accelerazione

- L'unico modo di non sentire la gravità è accelerare
- Abbandonandoci alla gravità proviamo l'assenza di gravità
- Se sentiamo la gravità stiamo accelerando anche quando siamo comodamente seduti
- In caduta libera non si accelera

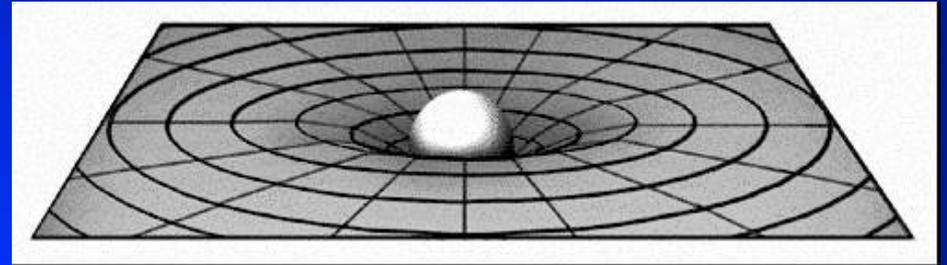
# Principio di equivalenza di Einstein

La forza che avvertiamo a causa della **gravità** e la forza che percepiamo in seguito ad un' **accelerazione** sono la stessa cosa

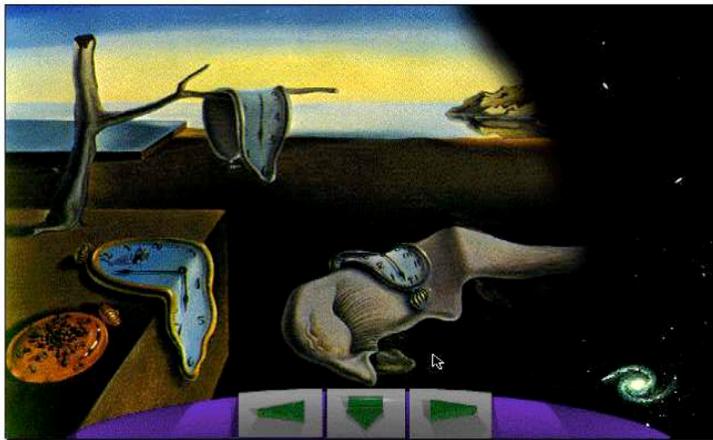
Non esiste alcun esperimento in grado di distinguere un riferimento inerziale da uno in caduta libera

# Conseguenze del P. d' E.

deformazione dello Spazio ...



... e del Tempo

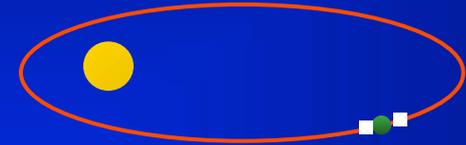


# Relatività Generale (1917)

- La gravità provoca **distorsioni** nel tessuto spaziotemporale
- Se c'è accelerazione le fette spaziotemporali sono **curve**
- La **gravità** non è una forza ma la manifestazione della **geometria spaziotemporale**
- I corpi si muovono liberamente nello spaziotempo seguendo la traiettoria più rettilinea possibile (**geodetica**)

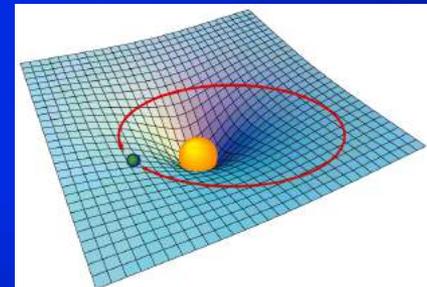
# Newton vs Einstein

**Newton: gravità è una forza**



la Terra si muove su orbita curva intorno al Sole perché la gravità solare la costringe ad allontanarsi dal suo cammino rettilineo naturale

**Einstein: gravità è curvatura**



massa del Sole distorce geometria dello spaziotempo vicino alla Terra e questa si muove liberamente lungo cammino il più possibile rettilineo ( $\approx$  ellisse ) in questo ambiente deformato

# Le Equazioni di Einstein

Sono equazioni di campo che pongono in relazione il grado e la natura della distorsione dello spazio-tempo con la materia gravitante che la produce

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

**geometria**  
spazio-tempo

=

**distribuzione**  
massa-energia  
della sorgente

**Lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi;**

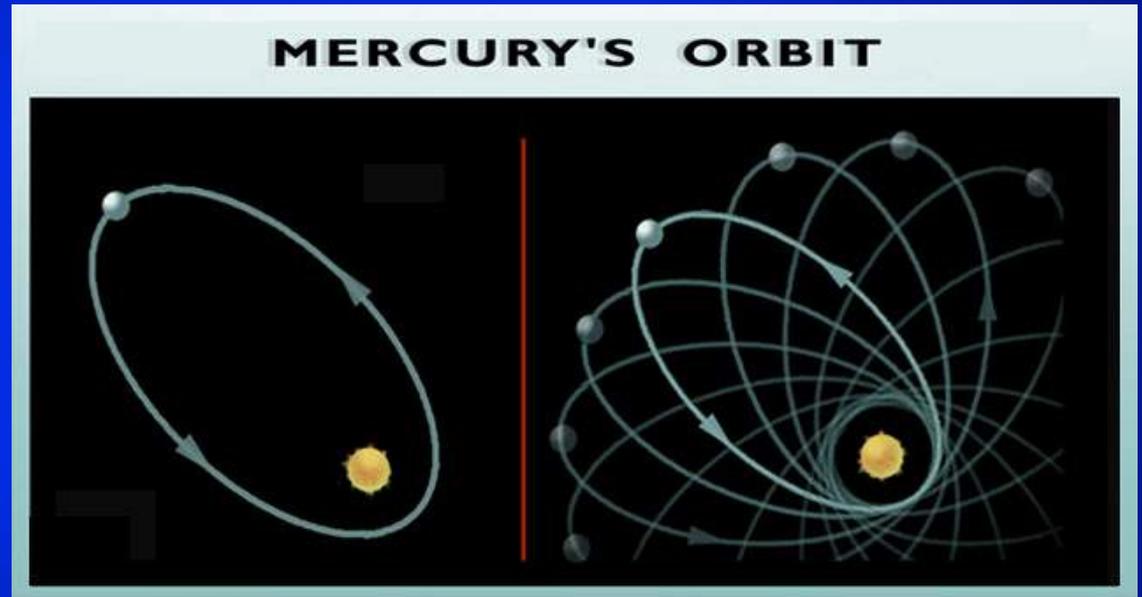
**La materia dice allo spazio-tempo come distorcersi**



# Verifiche Sperimentali

## 1. Orbita di Mercurio

Precessione lenta  
del perielio  
dell'orbita di circa  
**43" di arco/secolo**



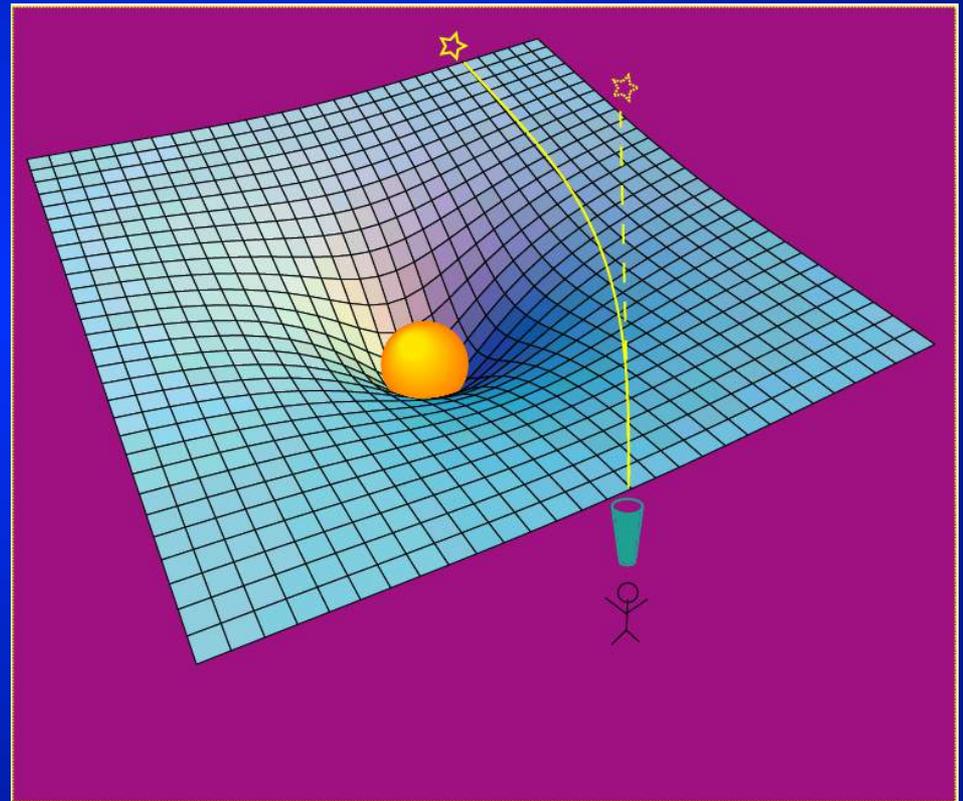
Teoria di Einstein è perfettamente in accordo con le osservazioni

# Verifiche Sperimentali

## 2. Curvatura della Luce

Effetto osservato per la prima volta nel 1919 da Eddington durante una eclisse di Sole

Entità dello spostamento della posizione apparente di una stella in perfetto accordo con quanto previsto dalla teoria di Einstein

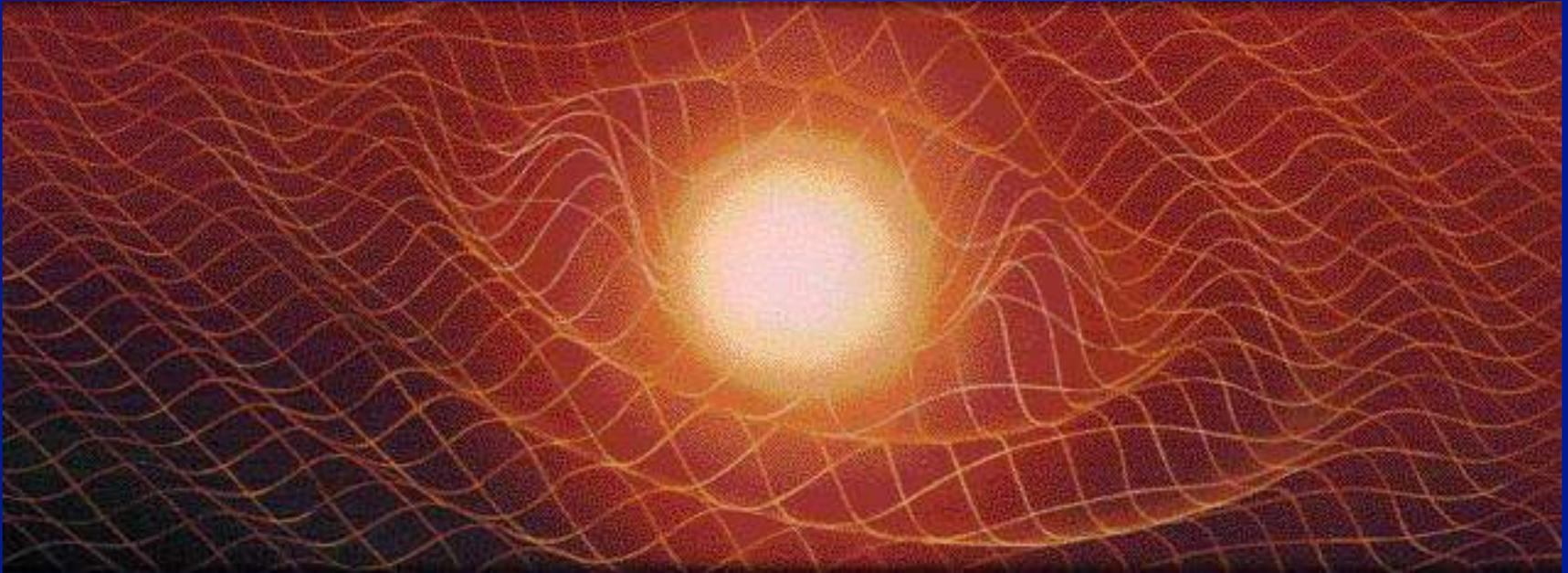


**Gravitational Lensing**

# Onde Gravitazionali

- Una previsione della teoria della relatività generale
- Le onde gravitazionali sono deformazioni dello spazio tempo che si propagano alla velocità della luce.
- Esse sono causate da una **variazione dello stato di moto delle masse**, sorgenti del campo gravitazionale

# Le onde gravitazionali: increspature dello spaziotempo

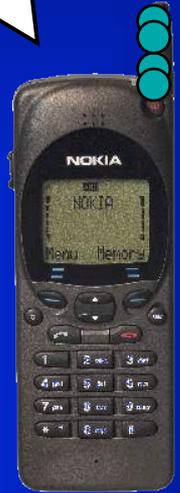


antenna

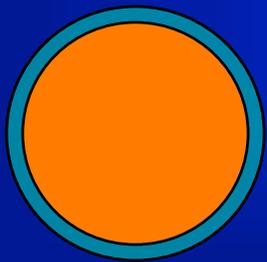


Le onde elettromagnetiche sono prodotte da cariche elettriche in movimento...

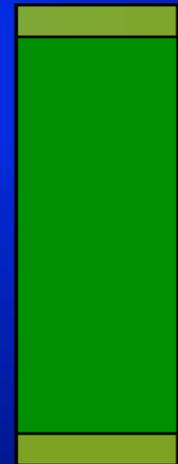
Ciao!  
Come  
va!



## Onde Gravitazionali: un'analogia



Le onde gravitazionali sono prodotte da masse in movimento...



# Caratteristiche delle O.G.

Interagiscono **molto debolmente** con la materia che attraversano.

**Lo scambio di energia** tra le onde gravitazionali e la materia attraversata è talmente **debole** che l'onda attraversa la materia senza essere significativamente attenuata.

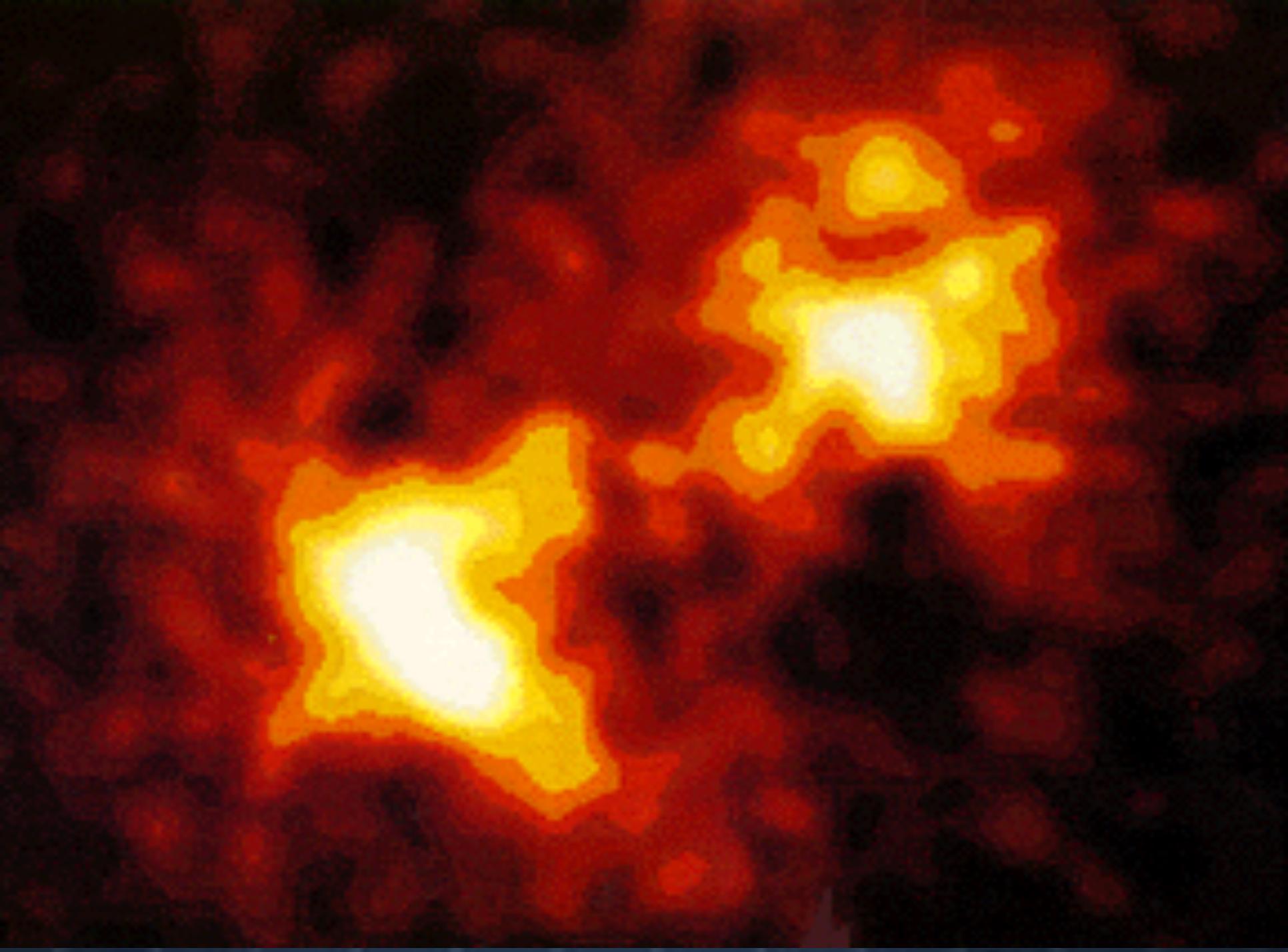
Il sole, la terra e tutta la materia interstellare in generale sono quasi **trasparenti** alle onde gravitazionali



# Fine di una stella

- Stelle come il nostro **Sole** evolvono come **nane bianche**
- Stelle con **massa maggiore** esplodono in modo catastrofico (**Supernova**):
  - Il nucleo implode in stella a neutroni o buco nero
  - Strati esterni espulsi in modo esplosivo
  - Il nucleo collassato emette

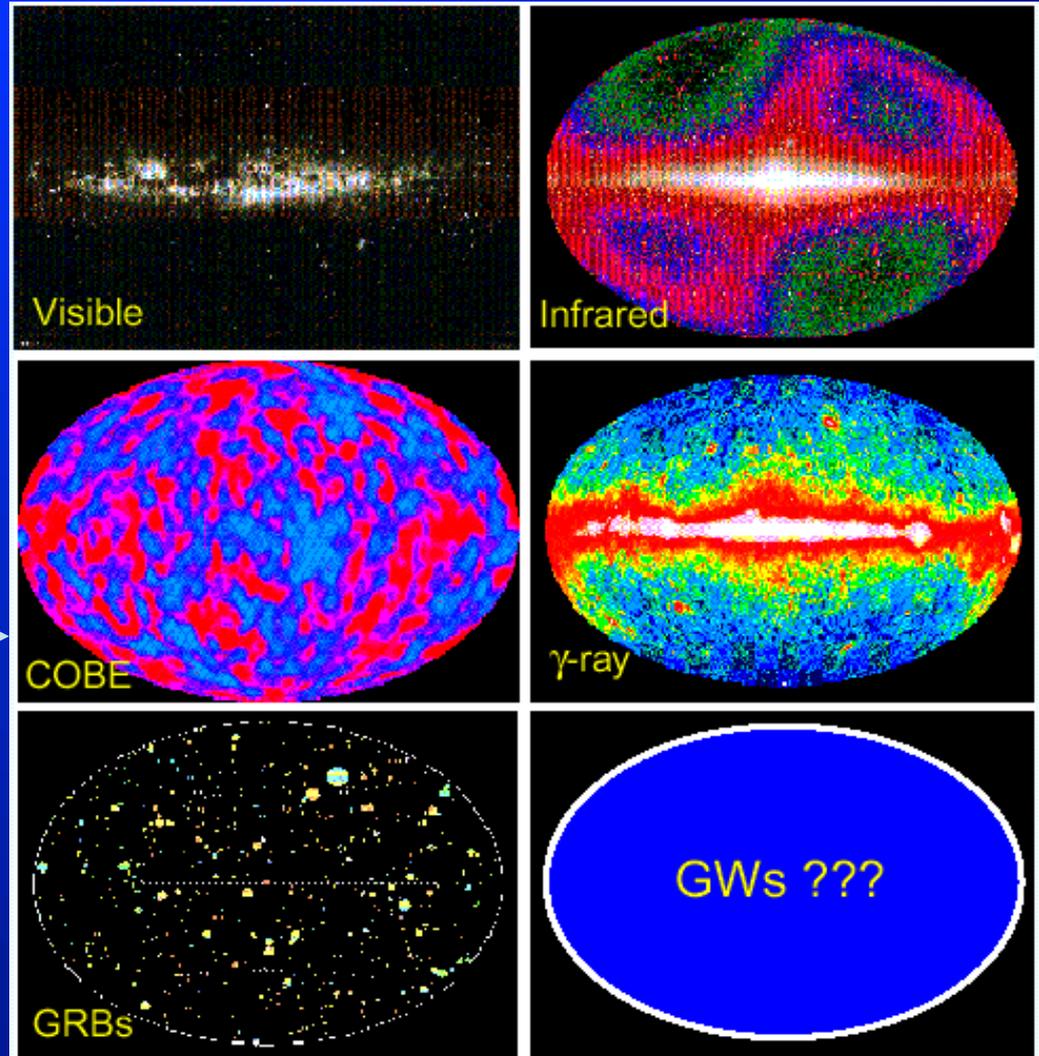
**Fiotto di Onde Gravitazionali**



# A cosa servono le O.G.?

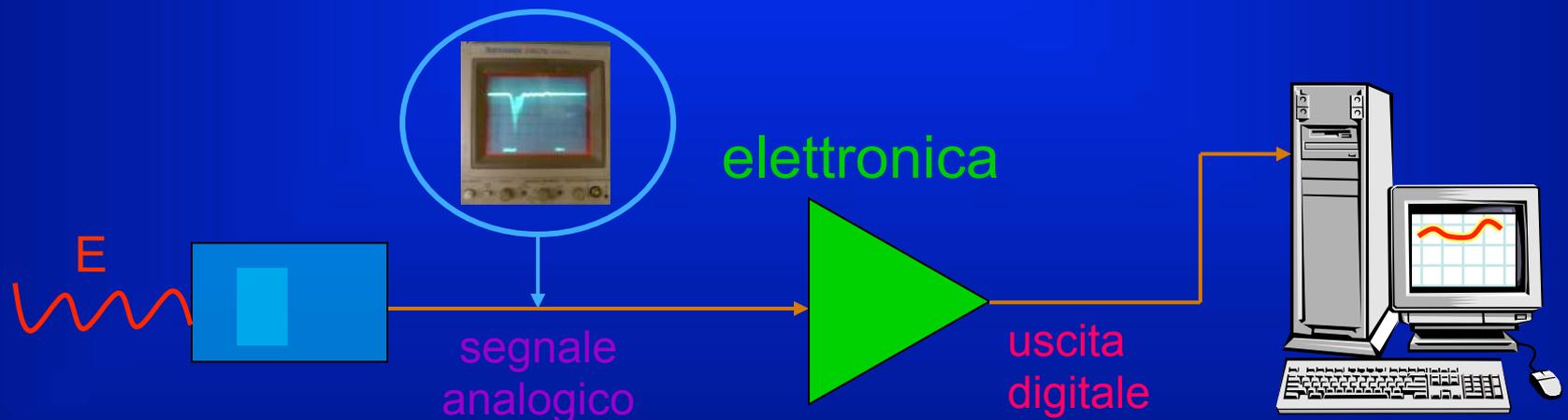
1. verifica diretta della **Relatività Generale**
2. nascita dell'**Astrofisica Gravitazionale**
3. esistenza di **fondo cosmico di O.G.** →  
“fotografia” dello stato dell'Universo  $\sim 10^{-43}$  s dopo Big Bang

**N.B.** fondo cosmico di microonde: la “foto” si riferisce a  $\sim 3 \times 10^5$  anni dopo B.B.



# Come funziona un Rivelatore?

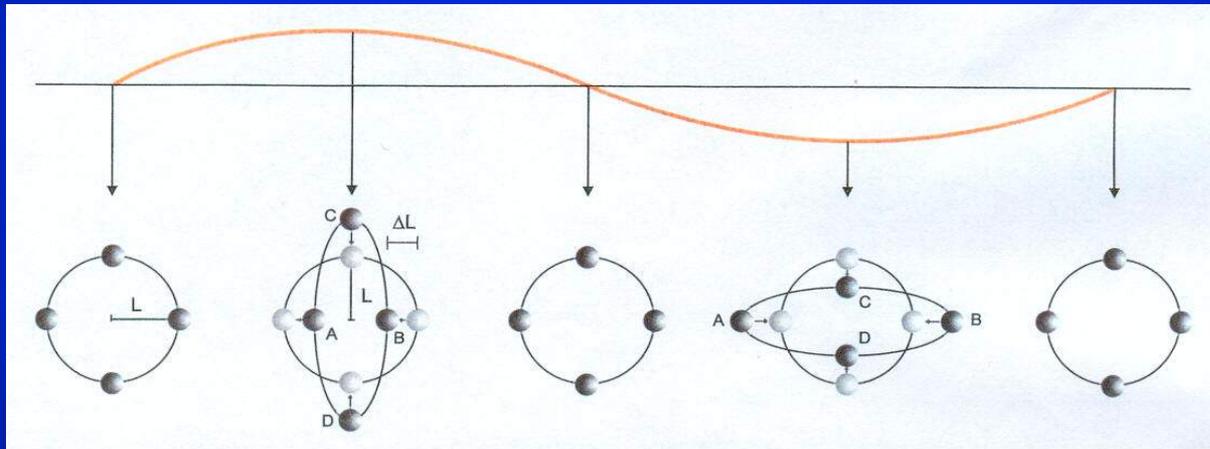
- L'onda o la particella attraversa il rivelatore
- Interazione con gli atomi ( $e^- + \text{nucleo}$ ) del mezzo
- Trasferimento di energia al rivelatore
- Conversione in forma d'energia accessibile



# Effetto delle O.G.

Onda Gravitazionale = perturbazione del Campo Gravitazionale che deforma la geometria dello spazio che investe

Effetto analogo a quello delle forze di marea



Variazione delle dimensioni  $\Rightarrow$

intensità della O.G.

$$\Delta L = h L$$



# Entità delle deformazioni indotte

Esplosione di supernova nella Galassia  $\rightarrow h \approx 10^{-18}$

Ovvero:

$L = 1 \text{ km} \rightarrow \Delta L \approx 10^{-15} \text{ m} \approx \text{raggio protone !!}$

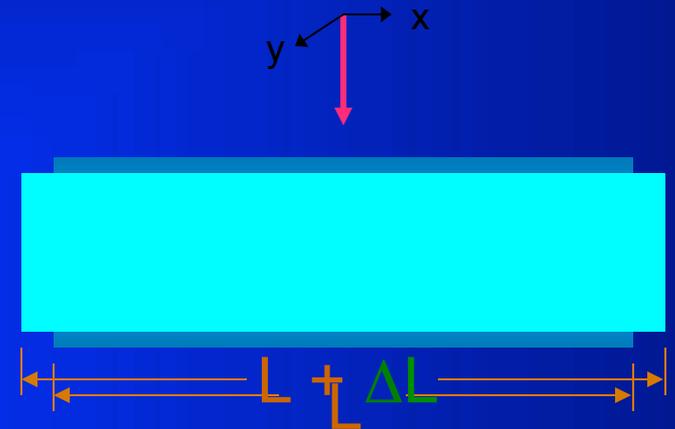
$L = 300000 \text{ Km} \rightarrow \Delta L \approx 10^{-10} \text{ m !!}$

(la precisione dei moderni strumenti a laser con cui si stima la distanza terra-sole hanno la precisione al centimetro )

# Rivelatori di O.G.

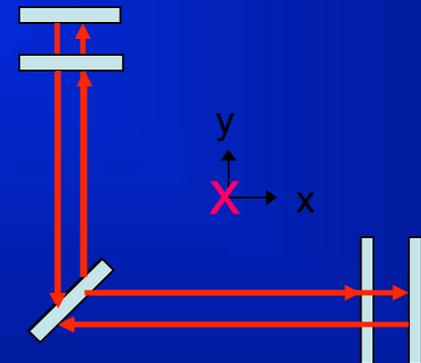
## Rivelatori Risonanti

O.G. eccita modi di vibrazione longitudinali della barra



## Rivelatori Interferometrici

O.G. produce differenza di cammino della luce lungo bracci  $\perp$  dell' interferometro

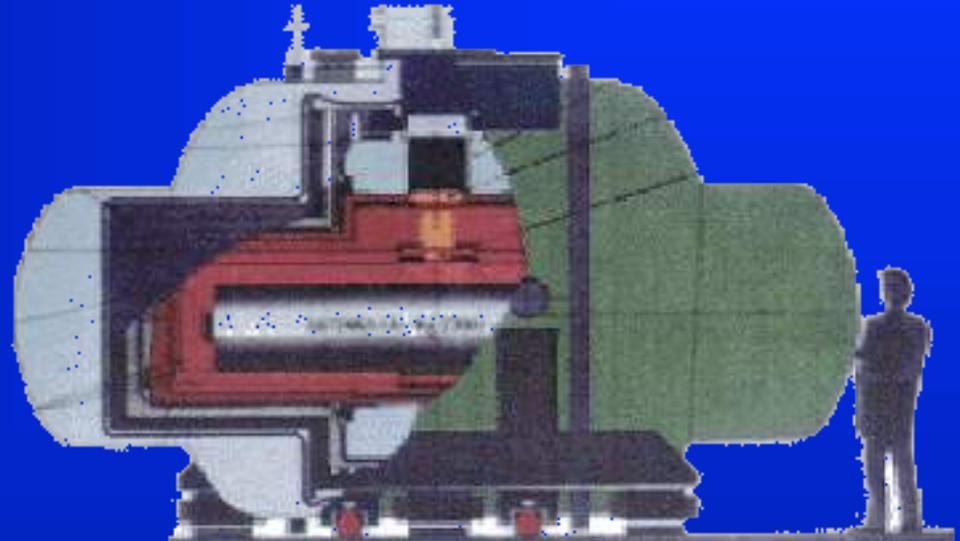


# La ricerca di Onde gravitazionali

## Nautilus

Barra di Al  $L=3\text{m}$

$$\Delta L = 10^{-18} \text{ m}$$



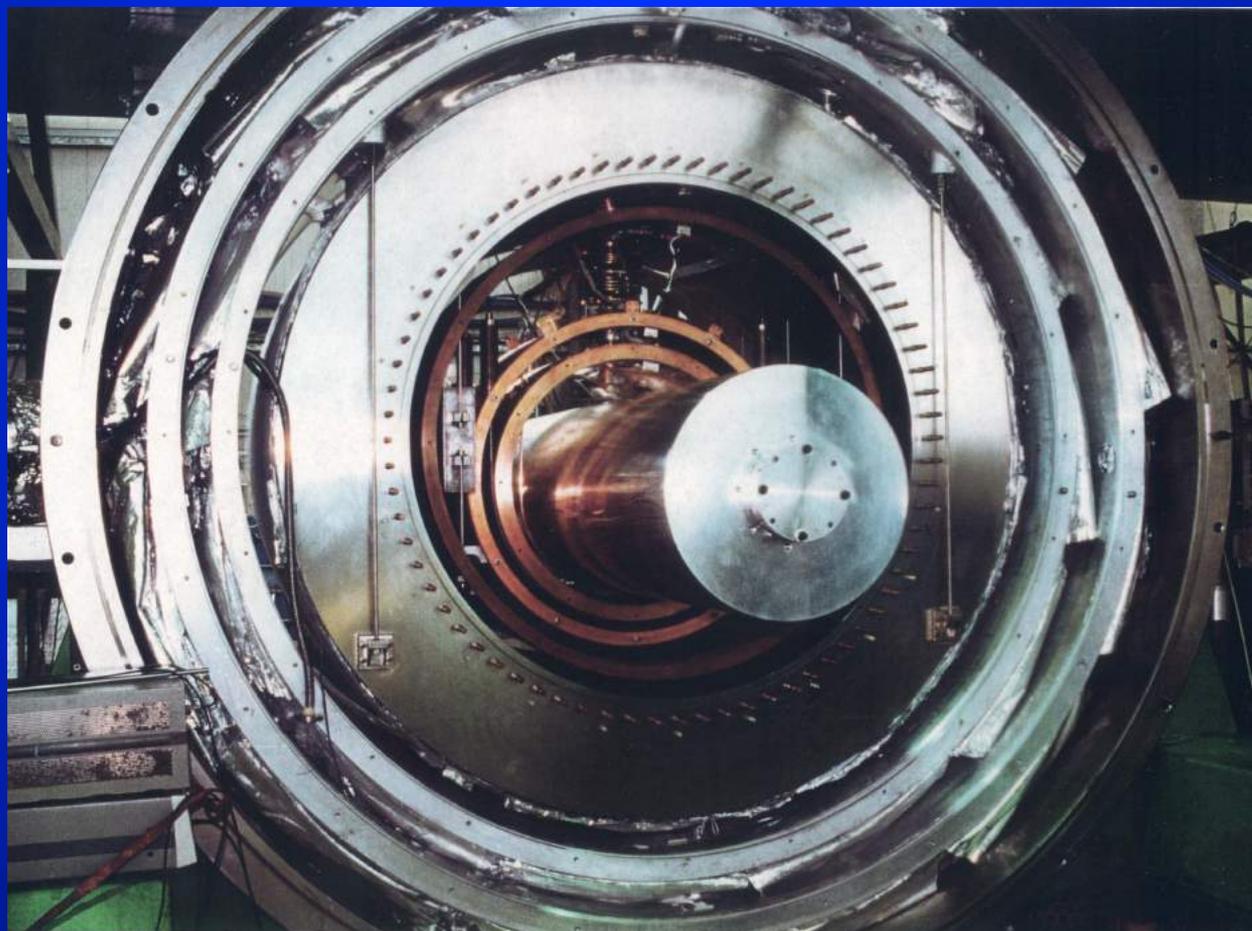
- Supernova nella nostra Galassia  $h=10^{-18}$
- Supernova in Virgo  $h=10^{-21}$
- Rumore termico @  $T=300 \text{ K}$ ,  $\Delta L=10^{-16} \text{ m}$
- Rumore termico @  $T=3 \text{ K}$ ,  $\Delta L=10^{-17} \text{ m}$
- Rumore termico @  $T=300 \text{ mK} \rightarrow \Delta L=10^{-18} \text{ m}$

# Nautilus

Rivelatore  
risonante  
ultracriogenico



# Nautilus



# Gravitational Wave Detectors

**ROG Collaboration**  
LNF, Roma1, Roma2

- Interferometer
- Resonant-Mass

● GEO

EXPLORER

AURIGA

VIRGO

NAUTILUS

gravitational wave



CERN RE 5



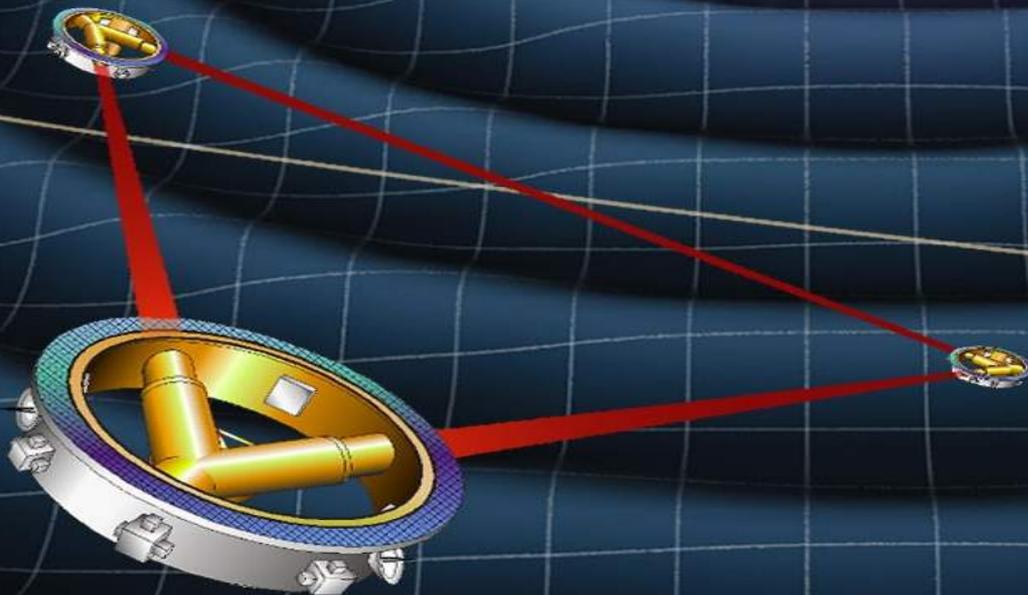
LNF INFN

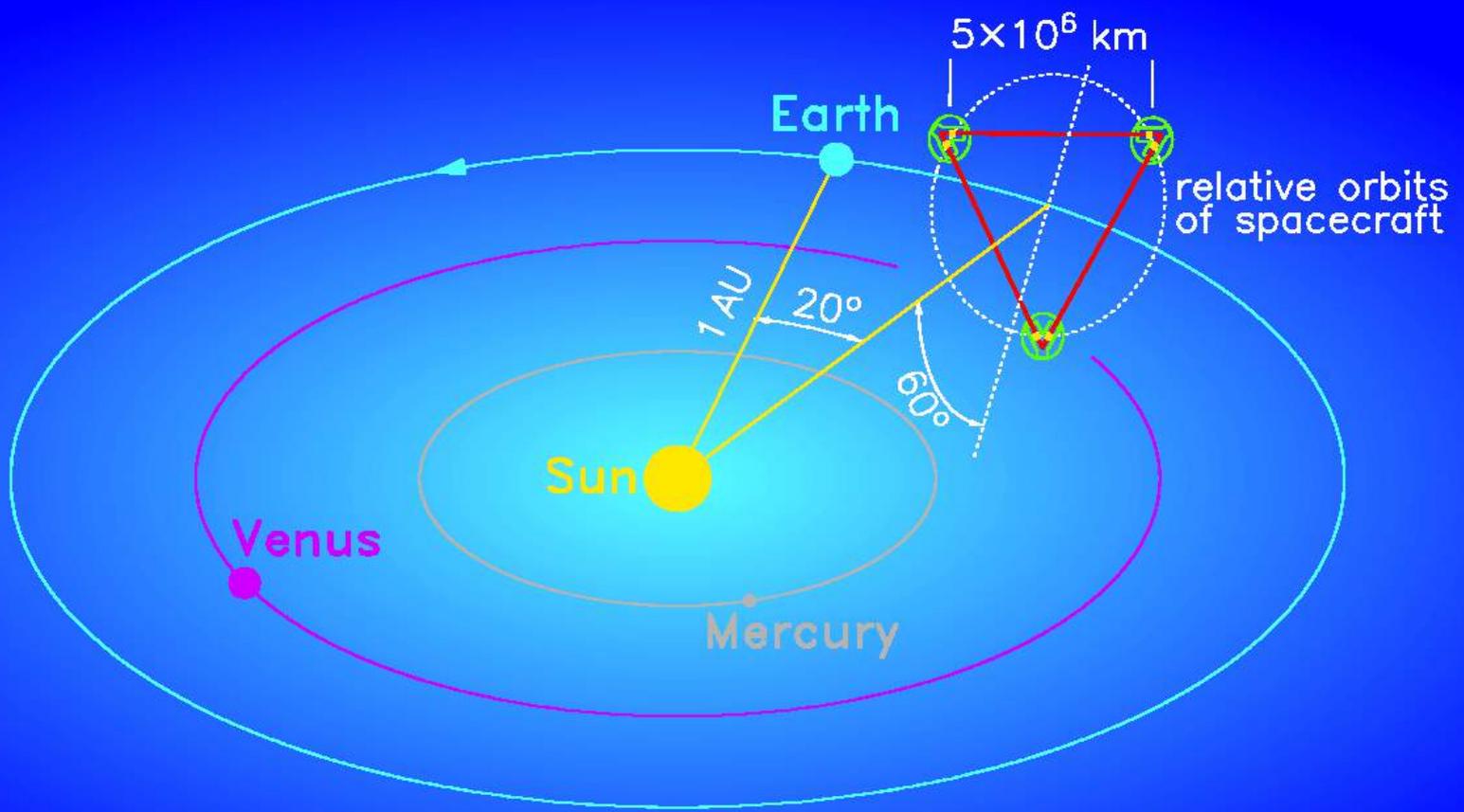


# Virgo



# LISA





Earth

$5 \times 10^6$  km

relative orbits of spacecraft

1 AU

$20^\circ$

$60^\circ$

Sun

Venus

Mercury

# Rete mondiale di rivelatori di O.G.



# Riferimento

[silvia.miozzi@Inf.infn.it](mailto:silvia.miozzi@Inf.infn.it)

