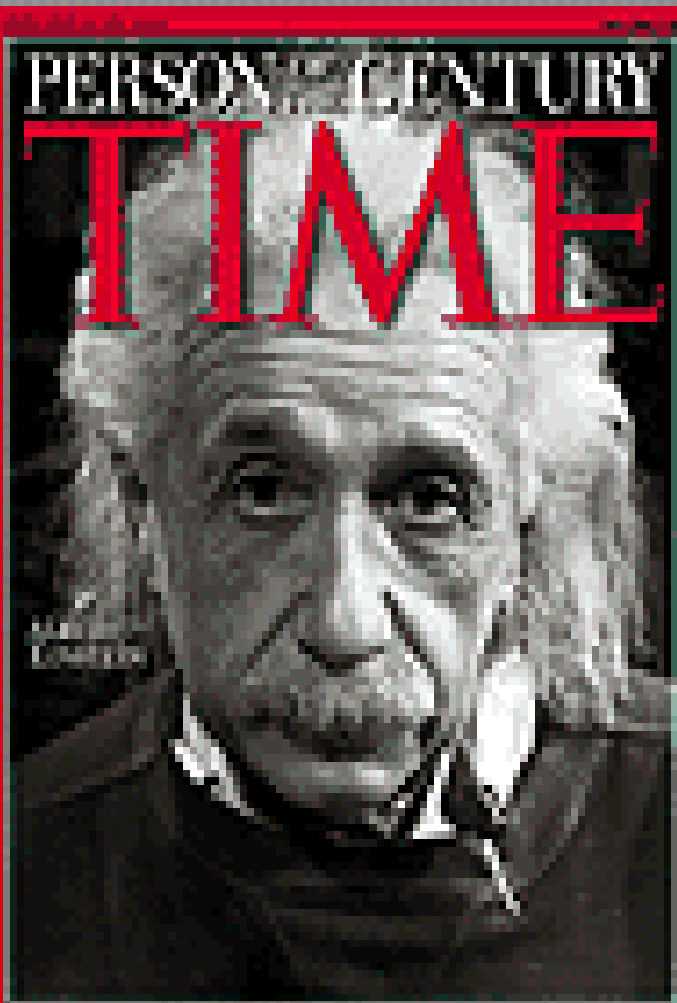


# La gravità: da Newton ad Einstein

Francesco De Paolis

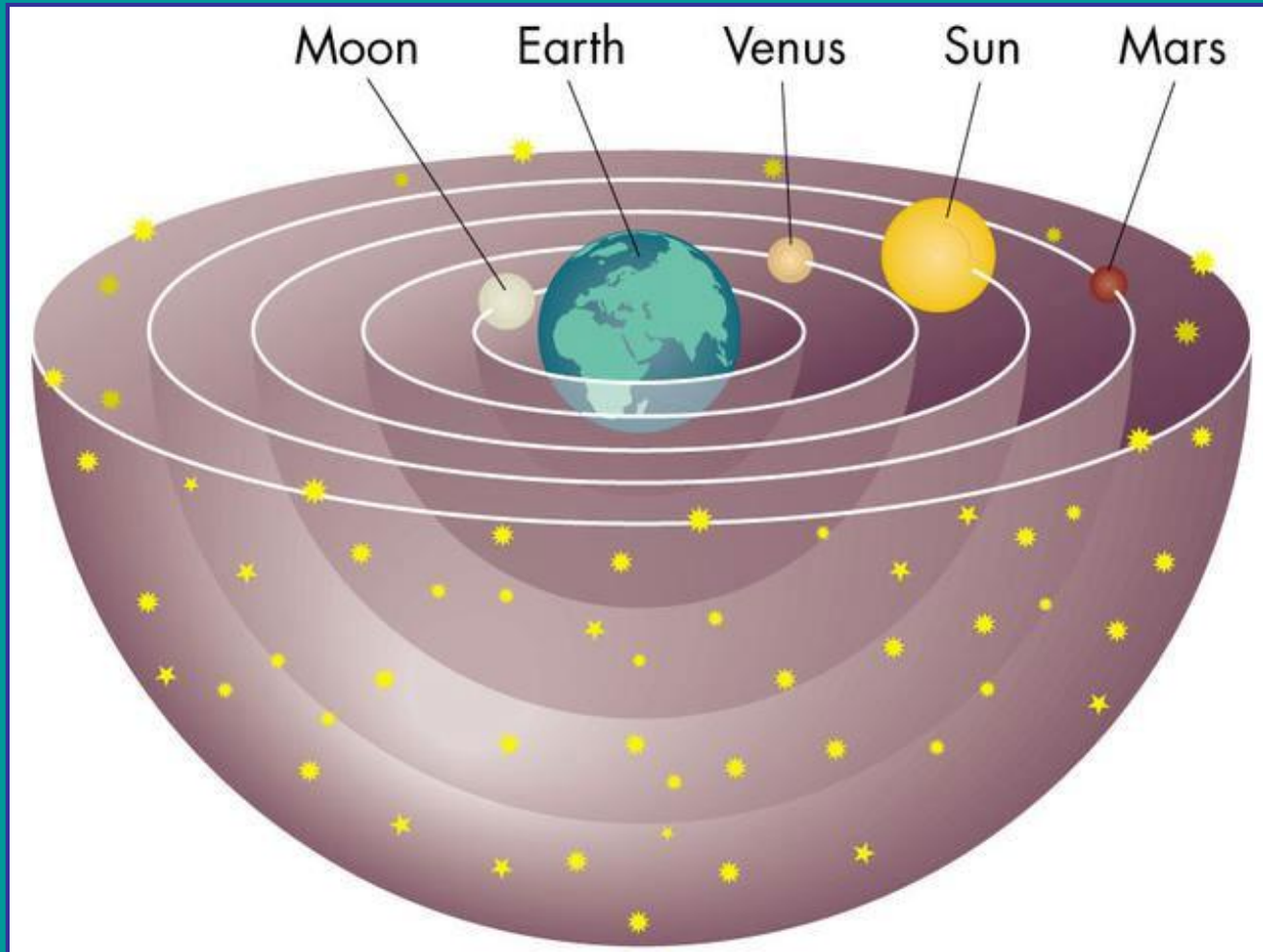


Einstein è una straordinaria icona del '900. Qualunque cosa di profondamente rivoluzionario nella fisica del '900 parte da Einstein.

Quello che noi pensiamo di Einstein cozza fortemente con quello che lui pensava di se stesso: «So benissimo di non avere nessun talento particolare. Ad avermi condotto alle mie idee sono la curiosità, l'insistenza e la semplice perseveranza».

- La SCIENZA con Galileo Galilei e la FISICA con Newton sono nate (rispettivamente intorno al 1590 e al 1687) dal tentativo di comprendere la gravità.
- La comprensione Einsteiniana della gravità si sviluppa a partire dal 1907 con la formulazione del Principio di Equivalenza ed il tentativo di comprendere i problemi lasciati aperti dalla relatività speciale.
- La Teoria della Relatività Generale, pubblicata nel 1915, costituisce, diciamo oggi, la «teoria corretta del campo gravitazionale», che è il campo più importante perché intimamente legato allo spaziotempo.
- In qualche senso possiamo dire che la Relatività Generale è la teoria più fondamentale della fisica. Sicuramente è «la più bella delle teorie» (Lev Landau).

# Antefatto: la gravità e le orbite dei pianeti



Anticamente si pensava che il Sole e i pianeti si muovessero attorno alla Terra su orbite circolari: modello geocentrico o Tolemaico-Aristotelico

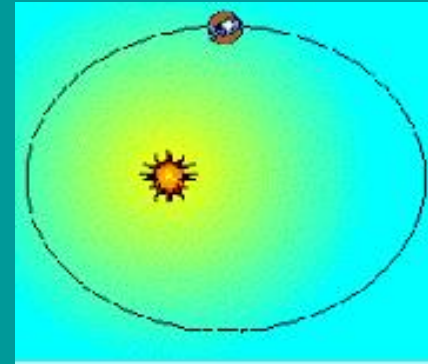


Solo meno di quattro secoli fa questa antica concezione dell'universo è cambiata. Copernico comprese che i pianeti, orbitavano attorno al Sole (ma ancora su orbite circolari): modello eliocentrico (o Copernicano).

Fu una grande rivoluzione, non solo scientifica ma culturale.

Intorno al 1670 uno studioso di nome **Giovanni Keplero**, dopo decenni di lavoro sui dati raccolti da un altro studioso ed abile osservatore, **Tycho Brahe**.....

.....arrivò alla conclusione che le orbite dei pianeti erano ellittiche e che il sole occupava uno dei fuochi.



# Newton spiega Keplero

Le leggi di Keplero spiegano **COME** si svolge il moto dei pianeti intorno al Sole e fissano delle regole valide per tutti i pianeti che compiono la loro orbita intorno al Sole

Ma **PERCHE'** i pianeti si comportano in questo modo?

Sarà Newton, partendo dalle leggi di Keplero e da quanto compreso da Galileo, a dare la risposta.



*"Se ho visto più lontano,  
è perchè stavo  
sulle spalle dei giganti"*

Isaac Newton, 5 febbraio 1675

# La mela di Newton

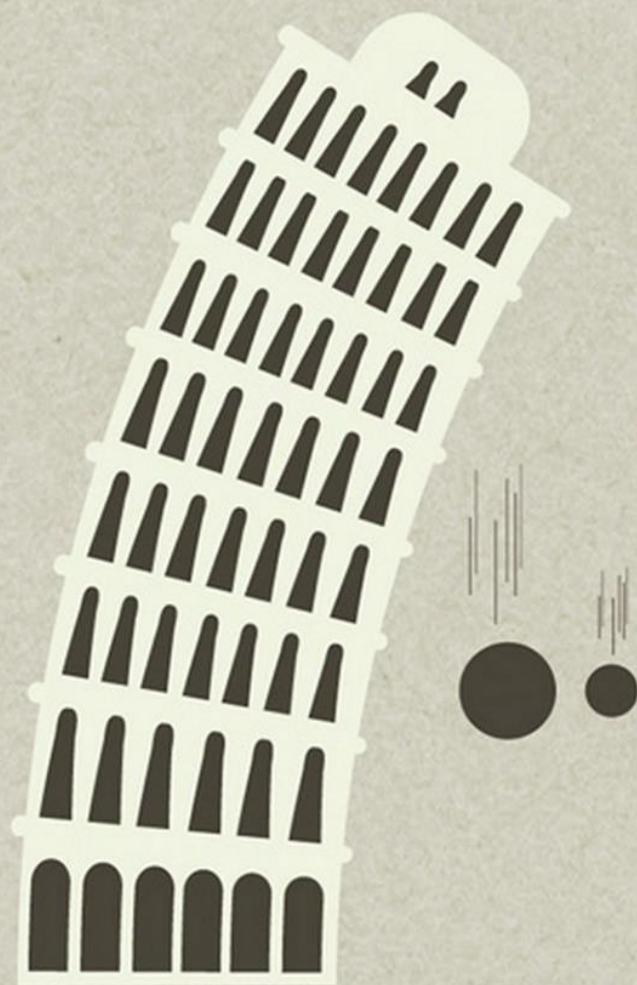


L'aneddoto della mela vuole indicare che, ad un certo punto, Newton *intuisce* che, come una **forza** costringe la mela a cadere a Terra (verso il centro della Terra), così una **forza** costringe i pianeti a girare intorno al Sole e la Luna a girare attorno alla Terra.

# Galileo e la caduta dei gravi



teoria di Aristotele



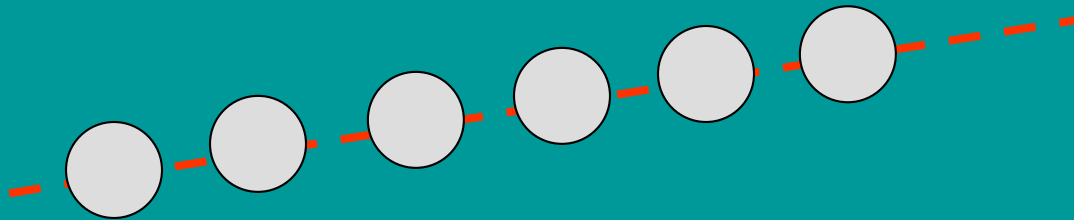
teoria di Galileo

# **Galileo ha ragione: esperimento sulla Luna del Cap. David Scott (Apollo 15, 1971)**

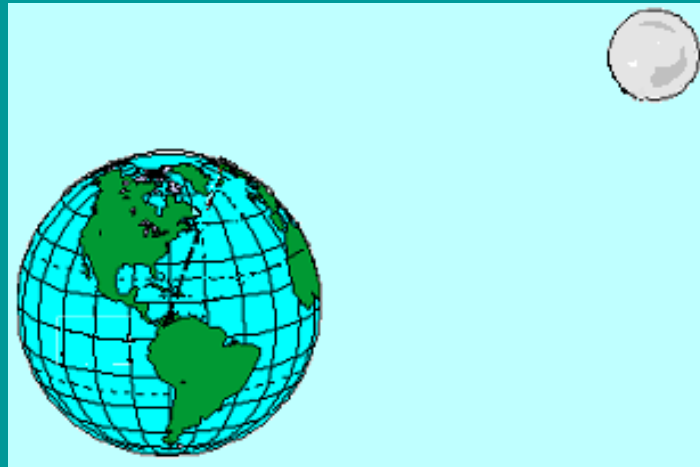


# Il principio di inerzia

Galileo comprese anche che un corpo in movimento su cui **NON** agiscono forze, si muove in linea retta a velocità costante  
**(principio d'inerzia)**



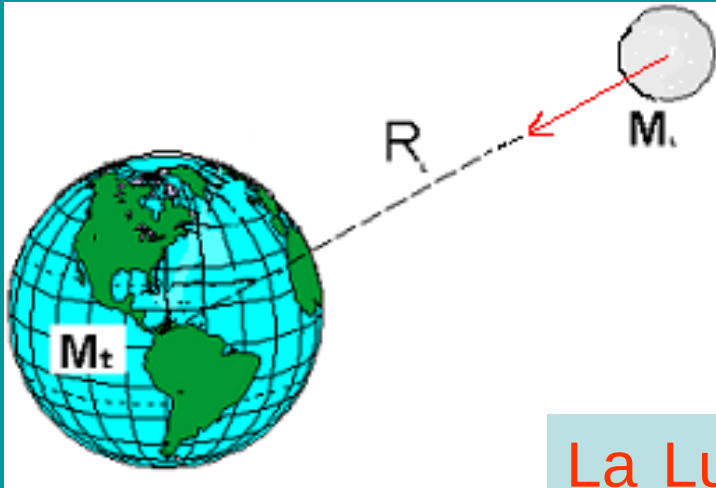
# La legge di gravitazione universale



Ma il moto dei pianeti intorno al Sole **non** è rettilineo, e **non** è rettilineo neppure il moto della Luna intorno alla Terra

C'è quindi una forza che agisce sulla Luna e sui pianeti che incurva continuamente il loro cammino attorno all'oggetto centrale

# La legge di gravitazione universale

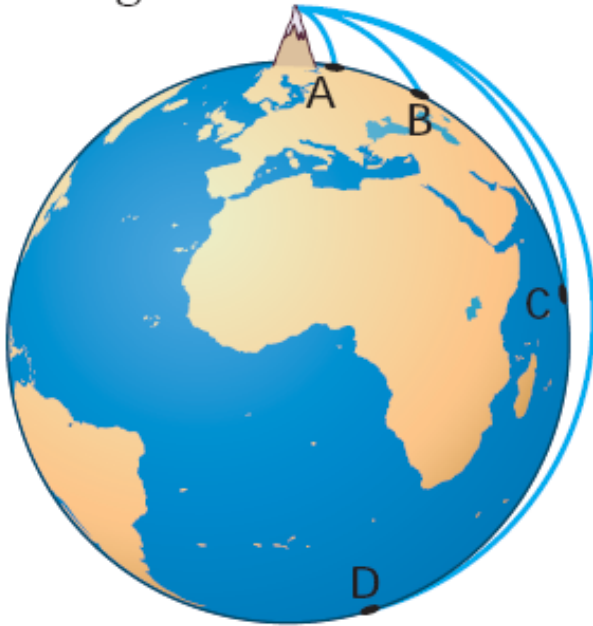


Newton comprese che questa forza è l'attrazione di gravità della Terra o quella esercitata dal Sole sui pianeti

La Luna ad esempio si comporta come un gigantesco proiettile sparato nello spazio, a distanza di 380.000 km dalla Terra, su cui agisce una potente "calamita" (l'attrazione di gravità) che "tira" la Luna verso il centro del nostro pianeta.

# Supponiamo di sparare orizzontalmente un proiettile dalla cima di una montagna (in assenza di aria e a velocità arbitraria)

► Più è grande la velocità iniziale, più il proiettile atterra lontano dalla montagna.



A

► Aumentando la velocità, a un certo punto il proiettile non atterra più.



B

La grande intuizione di Newton fu quella di unire le scoperte di Galileo e Keplero: capì così che la forza che fa cadere le mele è la stessa che fa girare i pianeti attorno al Sole. In un certo senso i pianeti «cadono» attorno al Sole. Inoltre, non si limita a osservare la gravità ma la definisce con un'equazione.

# La legge di gravitazione universale

Newton formula la Legge di attrazione reciproca fra i corpi celesti (**Legge di Gravitazione Universale**) in questo modo:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

Dove:

**G** è una costante (costante di gravitazione universale), pari a circa  $6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$

**M** ed **m** sono le masse (in kg) che si attraggono

**r** è la distanza (in m) dai centri delle due masse

**F** è il modulo della forza di attrazione tra le due masse (in N)

**DEFINIZIONE:** la forza *F* di attrazione tra due masse *M* ed *m* è direttamente proporzionale a ciascuna delle due masse ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza

**La gravità è stata la prima «forza» ad essere studiata e compresa. Le altre tre sono: la forza elettromagnetica, la forza nucleare forte e la forza nucleare debole**

# La legge di gravitazione universale: da Keplero a Newton

$$\frac{r^3}{T^2} = K$$

con

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

Newton sapeva che la forza centripeta era

$$\frac{mv^2}{r}$$

...e aveva visto subito che la forza che legava il pianeta di massa  $m$  al Sole doveva andare come l'inverso del quadrato della distanza, cioè

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

- Newton così spiegò il meccanismo che regola il movimento dei pianeti, e non solo dei pianeti, ma delle stelle, delle mele, di ogni cosa...
- Newton spiega le maree, la velocità dei pianeti, la forma stessa della Terra e dei pianeti e tante altre cose con la sola formula che descrive la forza di gravità, perché ogni cosa che ha una massa è attratta da ogni altra cosa con massa.
- Tuttavia Newton non sa spiegare perché ci sia la forza di gravità e come possa agire. Dice «hypotheses non fingo» e «la fisica non deve spiegare il perché ma il come». (Tra l'altro Newton dice che nessuno studioso avrebbe mai potuto credere ad un'azione a distanza istantanea).

**Per Einstein era chiaro che la Relatività Ristretta era violata.**

- Einstein considera queste «affermazioni di comodo» e costruisce la Teoria della Relatività Generale anche perché era insoddisfatto dalla Relatività Ristretta che era valida solo nei sistemi di riferimento inerziali.

## ...sull'azione a distanza...

L'azione a distanza era un problema di principio anche per la forza di Coulomb e ci vorrà il concetto di **campo** dovuto soprattutto a Faraday, Maxwell e Poisson per comprendere che una carica elettrica (o una massa) crea una condizione nello spazio, un campo elettrico (o un campo gravitazionale), per cui gli oggetti attorno *sentono* qualcosa.

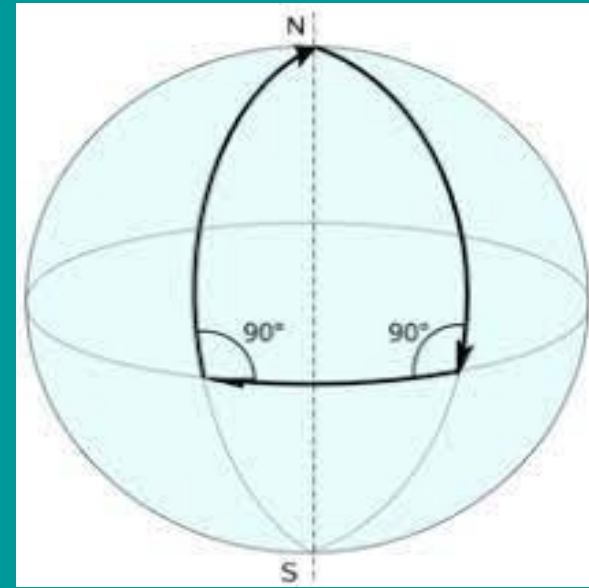
# The “Happiest Thought” of Einstein’s Life (1907)



“I was sitting in a chair in the patent office at Bern when all of a sudden a thought occurred to me: *if a person falls freely he will not feel his own weight ...* I was startled. This simple thought made a deep impression on me. It impelled me towards a theory of gravitation.”

# Relatività generale: l'idea

- **Principio di equivalenza:** in una zona **limitata** dello spazio-tempo un sistema di riferimento immobile in un campo gravitazionale è equivalente ad un sistema di riferimento opportunamente accelerato. Inoltre, è possibile «eliminare» il campo gravitazionale in un sistema di riferimento in caduta libera.
- **Principio di relatività generale:** le leggi della fisica hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento (generalizzazione del Principio di relatività ristretta).



# Massa inerziale e massa gravitazionale

- **massa inerziale,  $m_i$** : indica la resistenza del corpo ad essere accelerato;
- **massa gravitazionale,  $m_g$** : indica la capacità di attrarre oggetti ed essere attratto da essi.

**I dati sperimentali mostrano che le due masse sono *direttamente proporzionali*.**

...infatti...

$$m_i(1)a(1) = G \cdot \frac{M_T \cdot m_g(1)}{R_T^2}$$

$$m_i(2)a(2) = G \cdot \frac{M_T \cdot m_g(2)}{R_T^2}$$

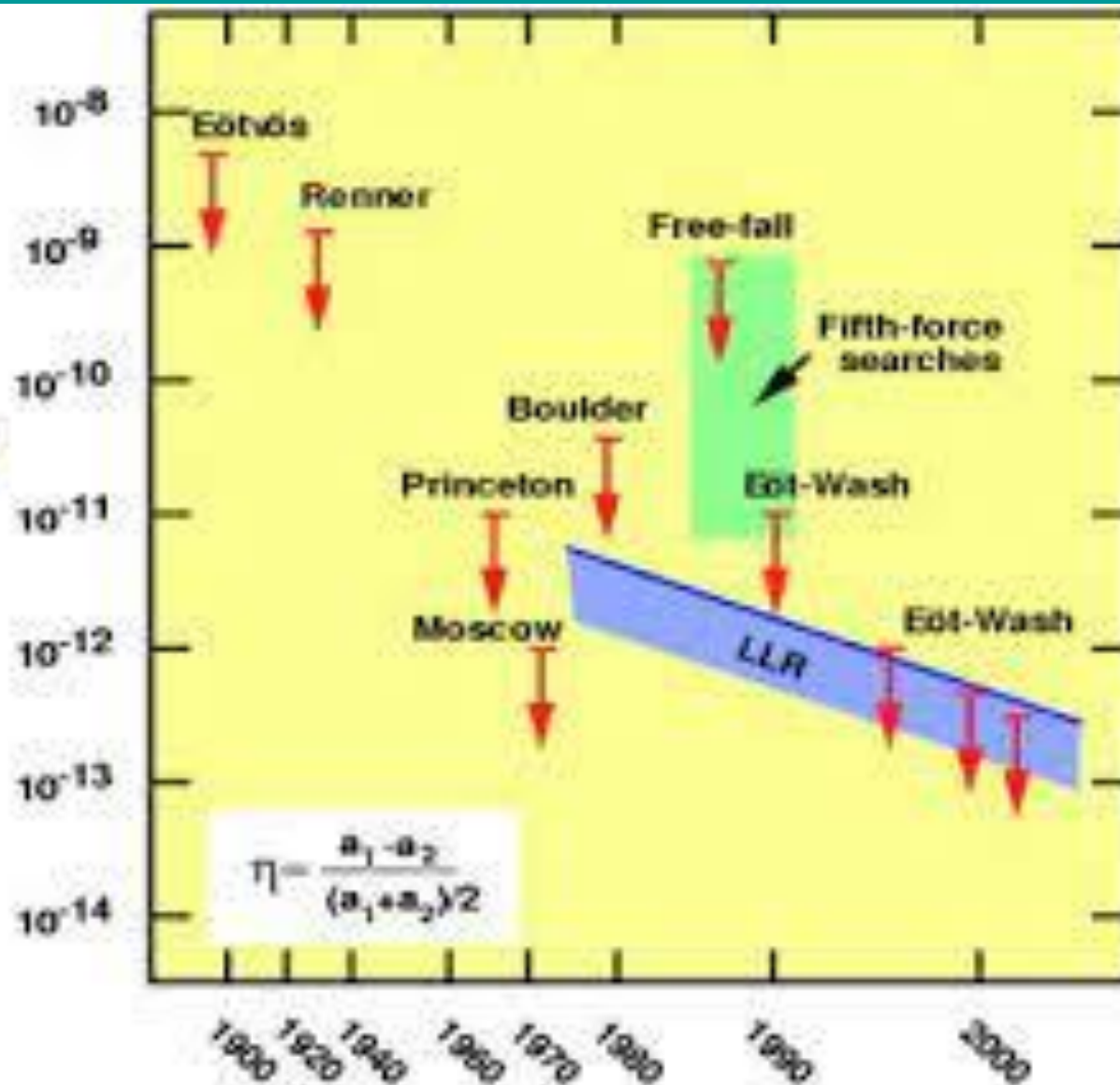
Ma se tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione  $a(1)=a(2)=g$

$$\frac{m_i(1)}{m_g(1)} = \frac{m_i(2)}{m_g(2)} = \text{cost} = 1$$

scegliendo opportunamente il valore della costante di gravitazione universale

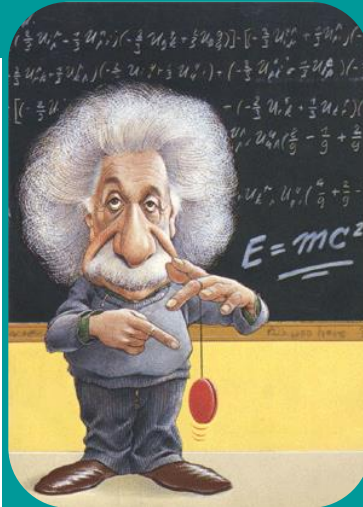
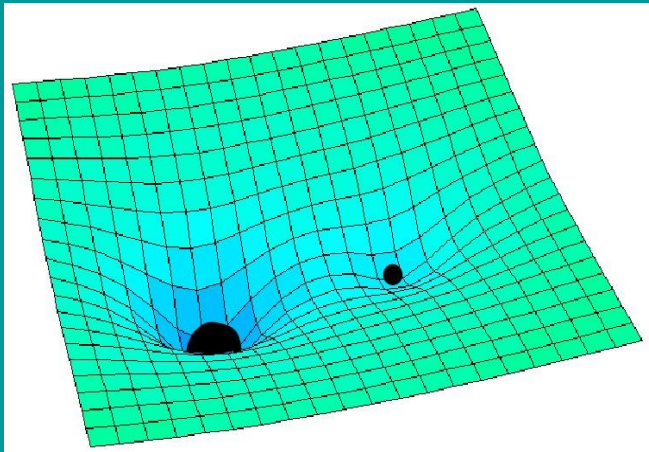
$$G = \frac{gR_T^2}{M_T} = 6.67 \times 10^{-11} (SI)$$

# Test del Principio di Equivalenza debole



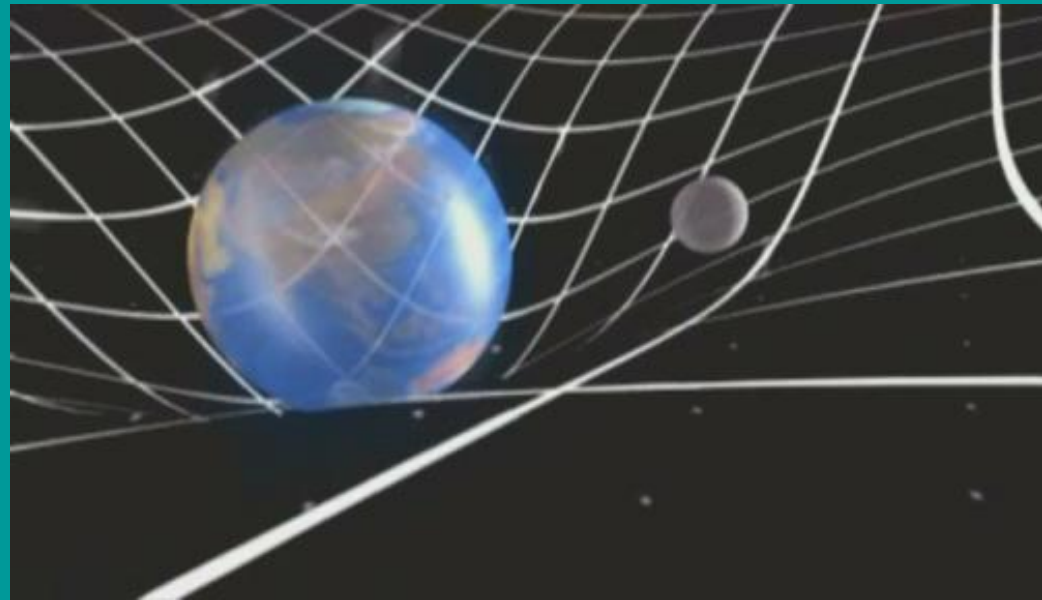
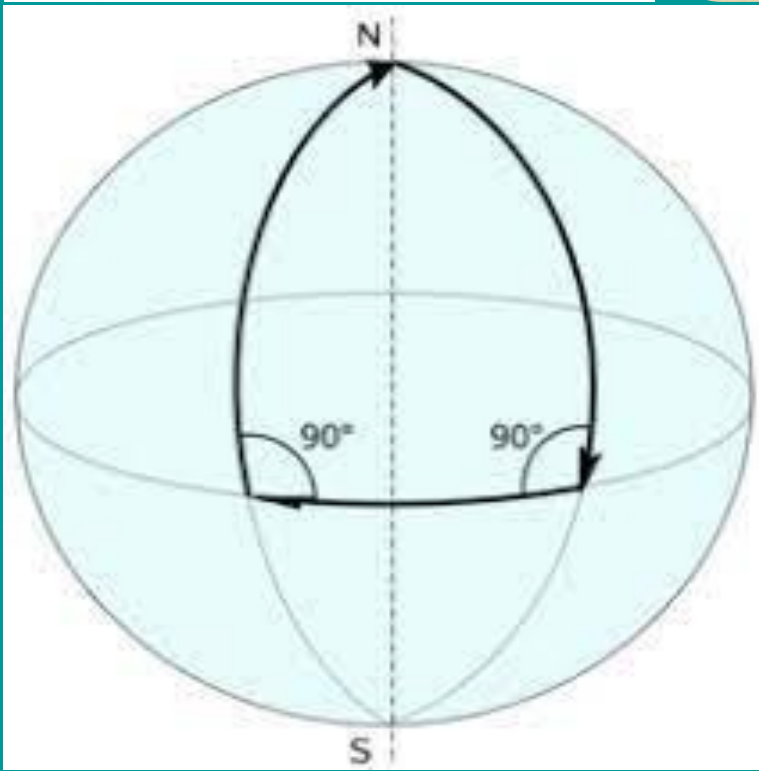
Per Newton il fatto che  $m_i = m_g$  è un caso, una coincidenza, per Einstein è una necessità ed una conseguenza ineludibile del Principio di Equivalenza (forte).

# La Relatività Generale come curvatura dello spazio-tempo



Newton non spiega la forza di gravità. Einstein la spiega nel 1915-1916 ma dice che non c'è nessuna forza di gravità.

**La gravità come curvatura dello spazio-tempo.**



# La relatività generale visualizzata con un foglio di gomma



# Le equazioni di campo della relatività generale

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

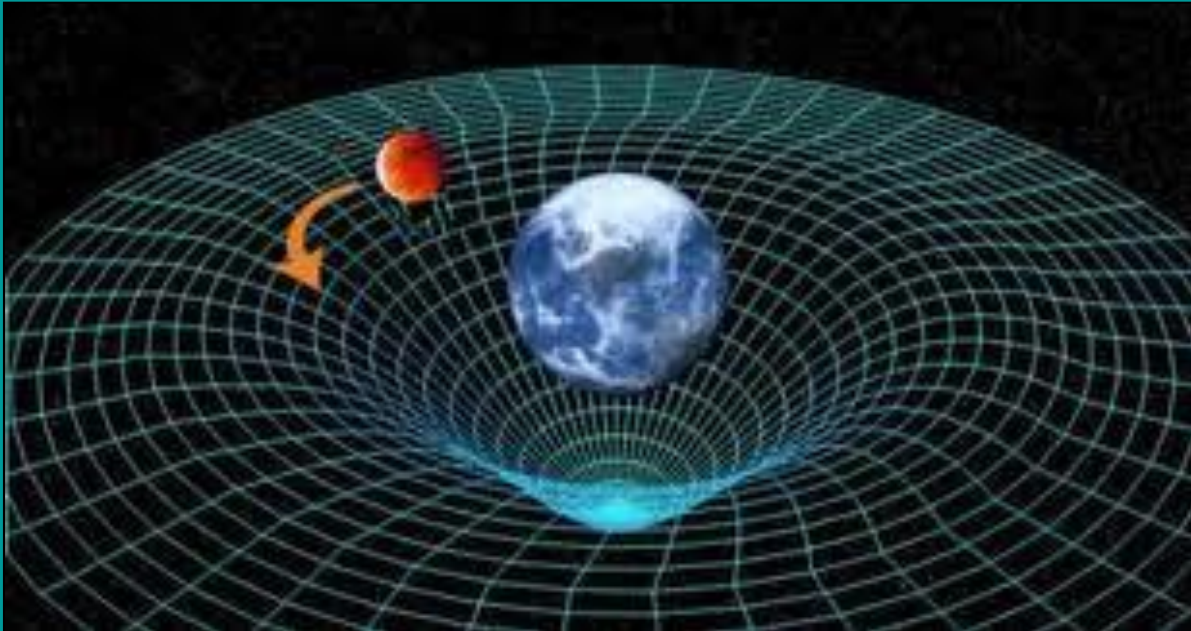
*Equazione di Poisson*

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad ; \quad \Delta\phi = 0$$

*Equazione di Laplace*

# Relatività generale: le idee

- La massa dice allo spazio-tempo come incurvarsi.
- Lo spazio-tempo dice alle masse come muoversi (*geodetiche*).
- Conseguenza: la gravità è spazio-tempo curvo.



# La demolizione dei concetti di spazio e tempo assoluti

Con la Relatività Generale i concetti Newtoniani di spazio e tempo assoluti vengono smantellati completamente. Spazio e tempo diventano attori della fisica e non più solo spettatori come nella teoria di Newton.

Einstein: «Con Newton si pensava che se la materia fosse scomparsa dall'universo allo spazio e al tempo non sarebbe successo niente. Secondo la Relatività Generale invece lo spazio e il tempo scomparirebbero assieme alla materia.»

# Gravità e tempo

In un campo gravitazionale le cose si muovono seguendo delle geodetiche (le traiettorie naturali)

$$\frac{d^2 x^a}{d\tau^2} + \Gamma^a_{\beta\gamma} \frac{dx^\beta}{d\tau} \frac{dx^\gamma}{d\tau} = 0$$

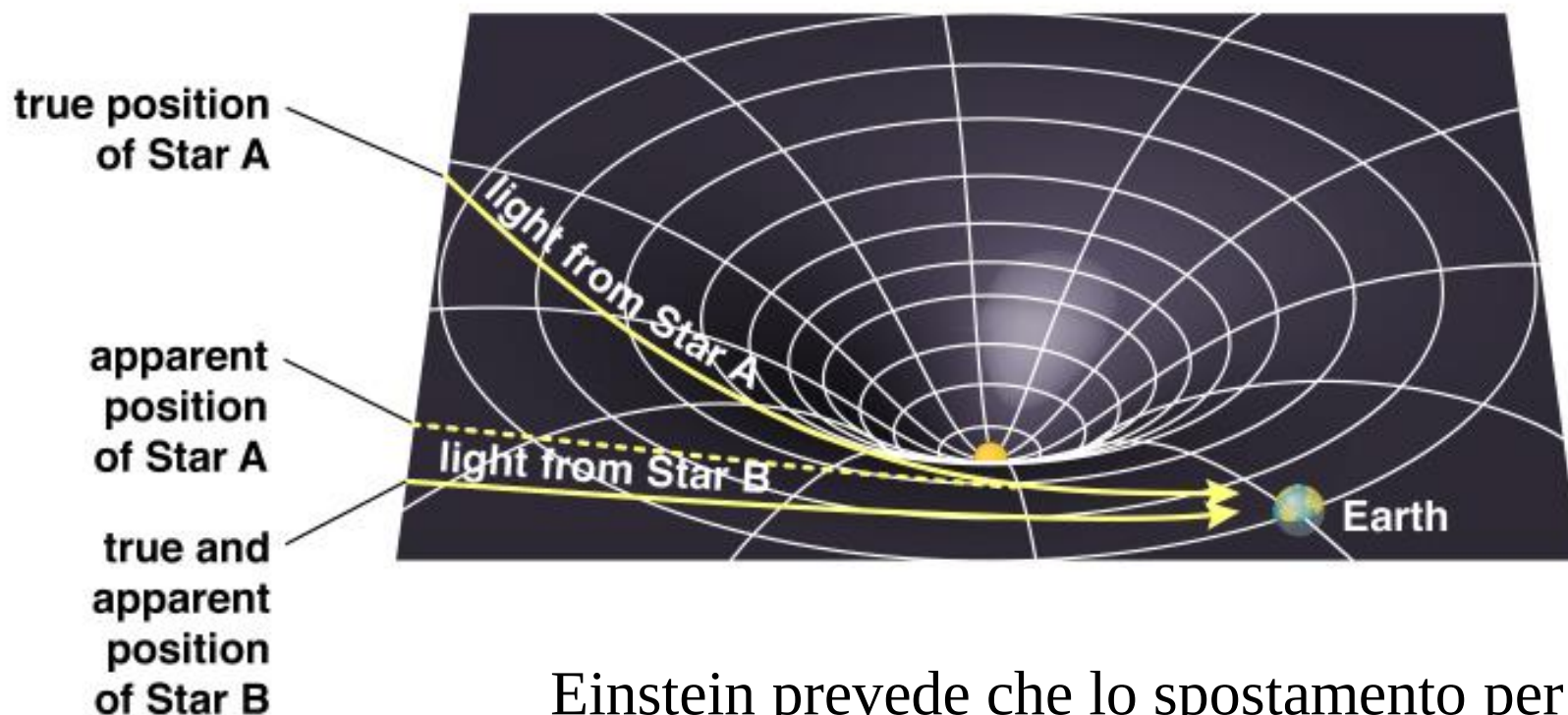
Possiamo anche dire che le cose cadono verso una massa perché questa rallenta il tempo nelle sue vicinanze. Cioè le cose tendono ad andare dove il tempo scorre più lentamente.

**Perché la GR è corretta:  
alcune conseguenze.**

Never bet against Einstein!

# Ci sono diverse conseguenze della Relatività Generale

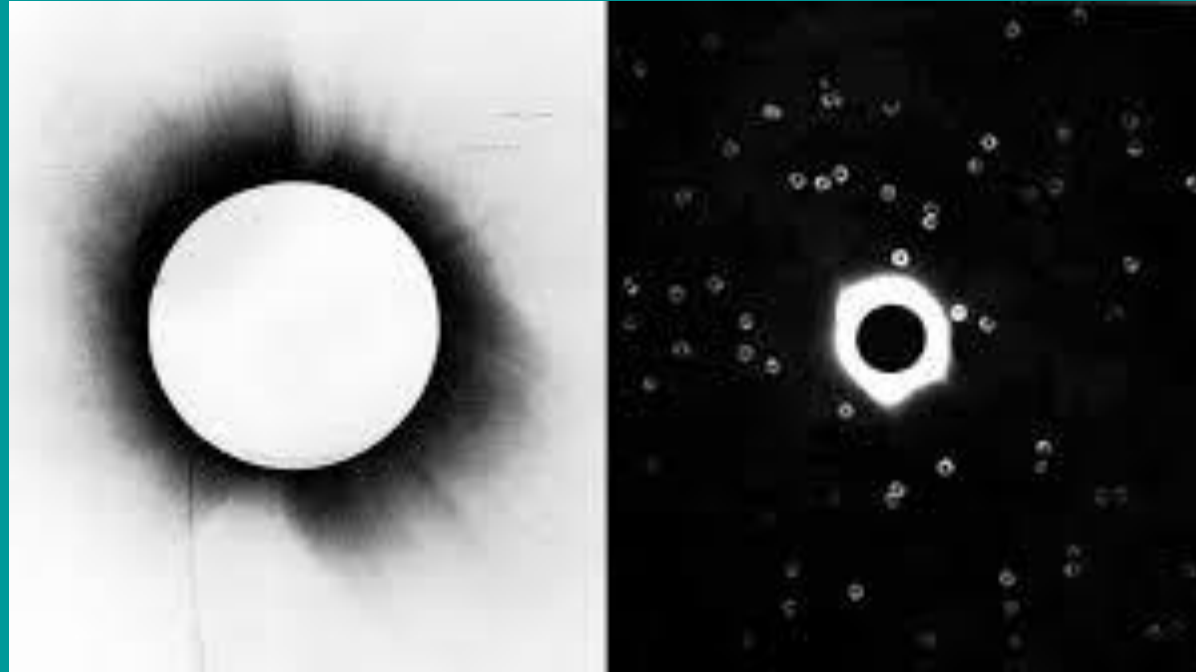
I corpi massicci deformano lo spazio-tempo alterando la propagazione della luce (che non va più in linea retta).



Einstein prevede che lo spostamento per una stella dietro al Sole sia di 1.75''

# Solar Eclipse Experiment

- Eddington et al.
  - 29 May 1919
  - Sobral and Principe Island
- Agrees with Einstein (1.75")
- Einstein becomes a celebrity



Within 1 year more than  
100 books written on  
GR!

Sobral

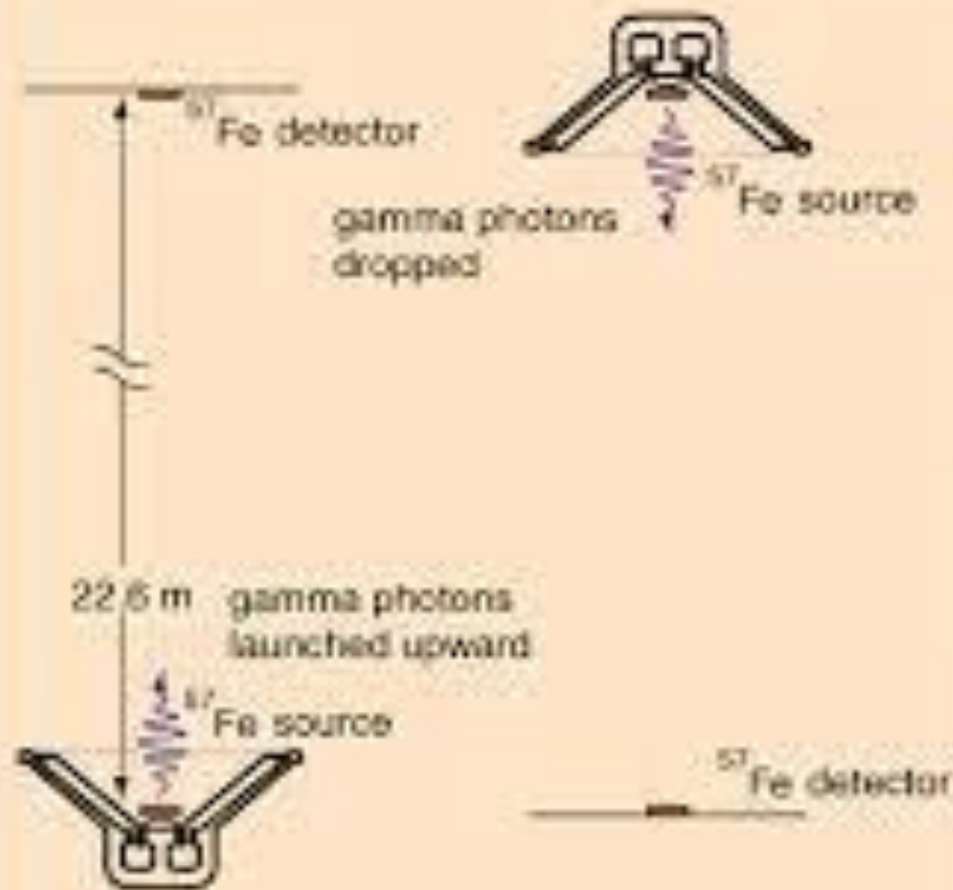
1.98 arcsec  $\pm 0.12$

Principe

1.61 arcsec  $\pm 0.3$

Alcune conseguenze: il redshift gravitazionale, verificato sperimentalmente nel 1925 da Adams su Sirio B e nel 1959 da Pound e Rebka al Jefferson Lab ad Harvard

## Harvard Tower Experiment



In just 22.6 meters, the fractional gravitational red shift given by

$$\nu = \nu_0 \left[ 1 + \frac{gh}{c^2} \right]$$

is just  $4.92 \times 10^{-15}$ , but the Mössbauer effect with the 14.4 keV gamma ray from iron-57 has a high enough resolution to detect that difference. In the early 60's physicists Pound, Rebka, and Snyder at the Jefferson Physical Laboratory at Harvard measured the shift to within 1% of the predicted shift.

# L'esperimento di Hafele-Keating (1971): verifica contemporanea degli effetti sul tempo della velocità e del campo gravitazionale

## The Hafele-Keating Experiment of 1971

Using a series of HP 5061A cesium beam **atomic clock**

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

rotation of  
Earth

due  
west

due east

clock 3

clock 2

clock 1

(speed of plane - speed of Earth) (speed of plane + speed of Earth)

smallest v  
largest t

$t_E < t_P$

largest v  
smallest t

$t_E > t_P$



center of the building connecting the main and second floors is being eliminated. New stairways are being constructed on either side, leaving the central space free for exhibits. The main entrance hall will have new cases for changing exhibits and at the back, opposite the front door, a group of herring gulls and common terns on sand dunes at Plymouth harbor. The lecture room floor is being leveled so that the room can be used for children's work also. A new room for study collections is provided in the basement. Exhibits are being rearranged by all the departments with the idea of appealing to the public rather than of adhering to the purely scientific point of view. Herpetological exhibits, for instance, will emphasize life histories and economic value of reptiles and amphibians; birds are grouped by habitat and status as residents. New labels to interest the visitor are being worked out. The museum is closed while alterations are being made. The date for the reopening of the building has not yet been set, but it will probably be early in the coming year.

## DISCUSSION

### LENS-LIKE ACTION OF A STAR BY THE DEVIATION OF LIGHT IN THE GRAVITATIONAL FIELD

SOME time ago, R. W. Mandl paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request. This note complies with his wish.

The light coming from a star  $A$  traverses the gravitational field of another star  $B$ , whose radius is  $R_0$ . Let there be an observer at a distance  $D$  from  $B$  and at a distance  $x$ , small compared with  $D$ , from the extended central line  $\overline{AB}$ . According to the general theory of relativity, let  $\alpha_0$  be the deviation of the light ray passing the star  $B$  at a distance  $R_0$  from its center.

For the sake of simplicity, let us assume that  $\overline{AB}$  is large, compared with the distance  $D$  of the observer from the deviating star  $B$ . We also neglect the eclipse (geometrical obscuration) by the star  $B$ , which indeed is negligible in all practically important cases. To permit this,  $D$  has to be very large compared to the radius  $R_0$  of the deviating star.

It follows from the law of deviation that an observer situated exactly on the extension of the central line  $\overline{AB}$  will perceive, instead of a point-like star  $A$ , a luminous circle of the angular radius  $\beta$  around the center of  $B$ , where

$$\beta = \sqrt{\alpha_0 \frac{R_0}{D}}.$$

It should be noted that this angular diameter  $\beta$  does

A COLLECTION of several hundred Californian plants which has all but encircled the earth is now being studied in the herbarium of the California Academy of Sciences in San Francisco. The specimens were collected in 1840 and 1841 by the Russians in the region then known as Russian California ("California boreal. Ross." the labels read) and were sent from California to the herbarium of the Russian Academy in St. Petersburg by way of Vladivostok and across Siberia. These same specimens which have remained unnamed for nearly a hundred years are being determined by J. T. Howell at the California Academy of Sciences after which they will be returned to the herbarium of the Academy of Sciences in Leningrad. The plants, which were collected in different parts of the Russian territory, were obtained by Vosnesensky ("Wosnessensky"), who was in the first party to climb Mt. St. Helena in the Californian Coast Ranges north of San Francisco. Fort Ross, the chief Russian port and settlement on the Californian coast, is about sixty miles north of San Francisco.

not decrease like  $1/D$ , but like  $1/\sqrt{D}$ , as the distance  $D$  increases.

Of course, there is no hope of observing this phenomenon directly. First, we shall scarcely ever approach closely enough to such a central line. Second, the angle  $\beta$  will defy the resolving power of our instruments. For,  $\alpha_0$  being of the order of magnitude of one second of arc, the angle  $R_0/D$ , under which the deviating star  $B$  is seen, is much smaller. Therefore, the light coming from the luminous circle can not be distinguished by an observer as geometrically different from that coming from the star  $B$ , but simply will manifest itself as increased apparent brightness of  $B$ .

The same will happen, if the observer is situated at a small distance  $x$  from the extended central line  $\overline{AB}$ . But then the observer will see  $A$  as two point-like light-sources, which are deviated from the true geometrical position of  $A$  by the angle  $\beta$ , approximately.

The apparent brightness of  $A$  will be increased by the lens-like action of the gravitational field of  $B$  in the ratio  $q$ . This  $q$  will be considerably larger than unity only if  $x$  is so small that the observed positions of  $A$  and  $B$  coincide, within the resolving power of our instruments. Simple geometric considerations lead to the expression

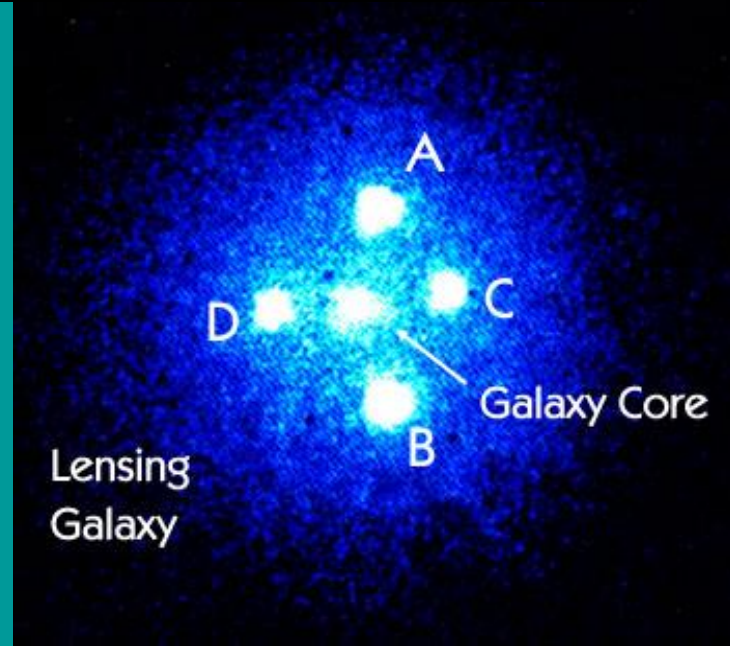
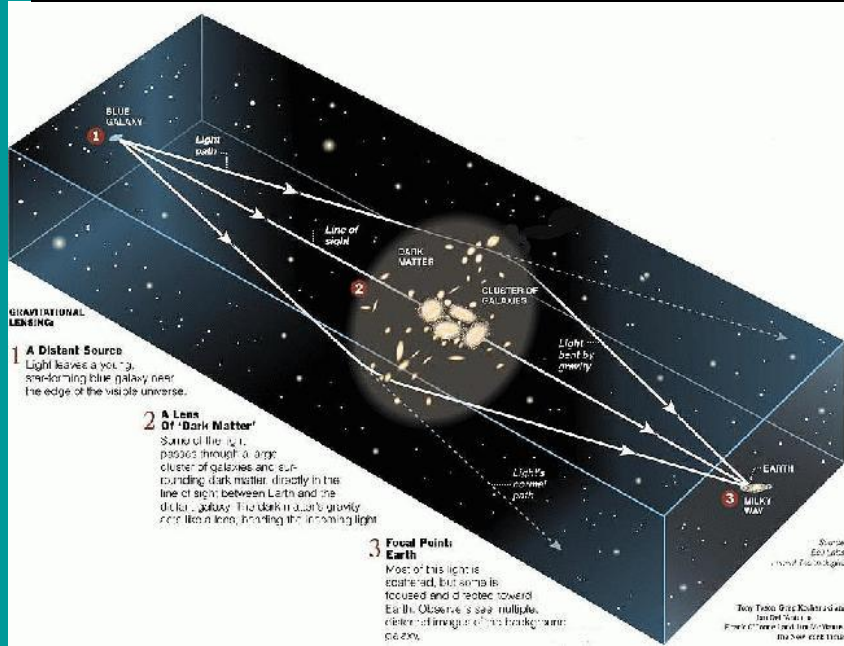
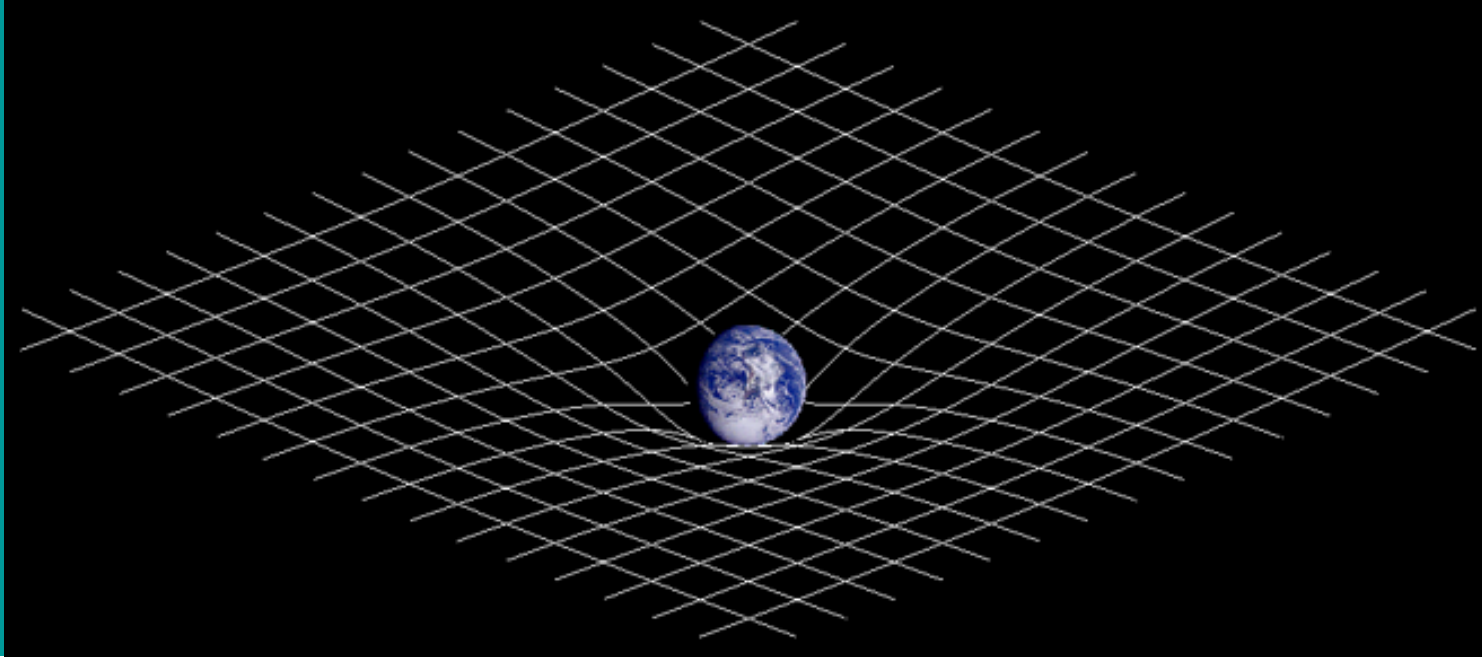
$$q = \frac{l}{x} \cdot \frac{1 + \frac{x^2}{2l^2}}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{4l^2}}},$$

where

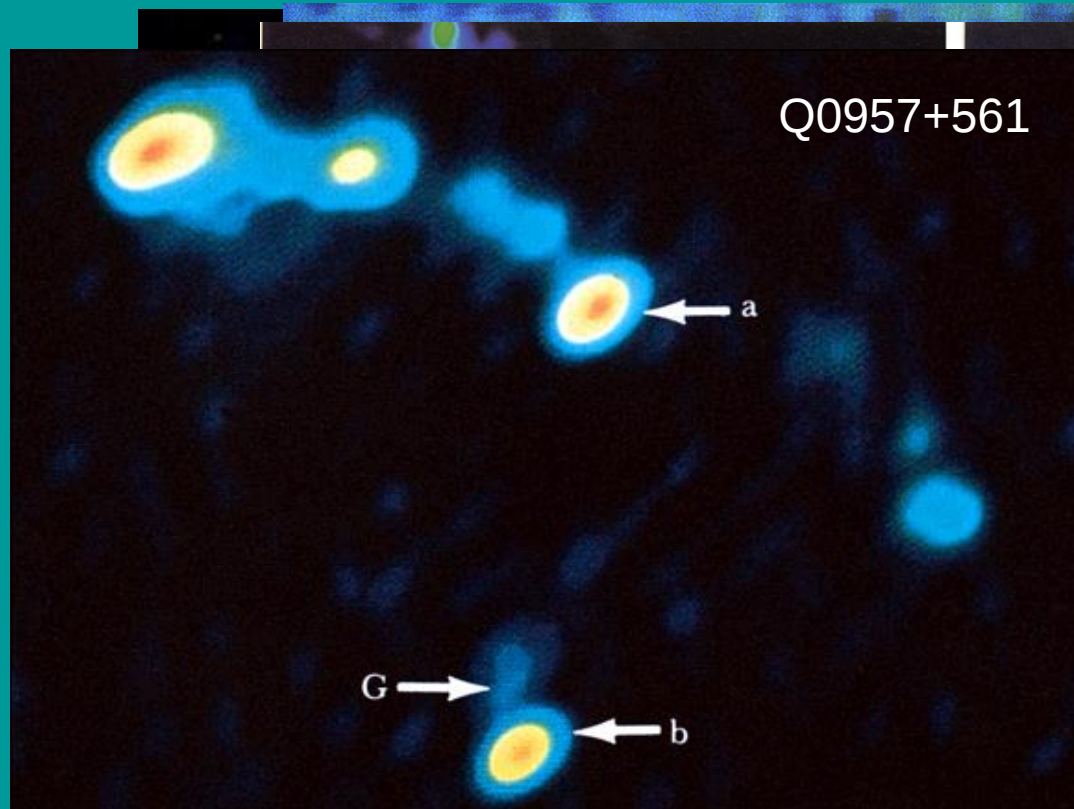
$$l = \sqrt{\alpha_0 D R_0}.$$

(1) "There is no chance of observing this phenomenon"  
(2) "It is impossible to separate the images since they are too close to the source"

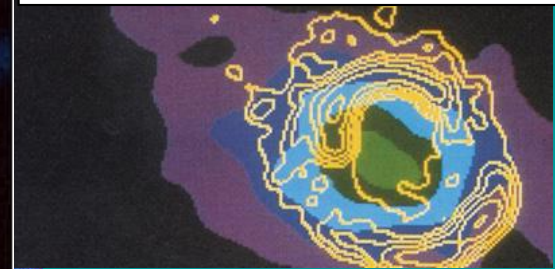
# Relatività generale e lensing gravitazionale



# Prove della relatività generale: lensing gravitazionale



$z_l=0.36$   
 $z_s=1.41$   
 $M_{\text{lens}}=4 \times 10^{11} \text{ Msun}$   
 $\theta_E=3''$



$z_l=0.254$   
 $z_s=1.74$   
 $M_{\text{lens}}=2 \times 10^{11} \text{ Msun}$   
 $\theta_E=3''$

$$\theta_E = \left[ \frac{D_{ls}}{D_l D_s} \frac{4GM(\theta_E)}{c^2} \right]^{1/2}$$

# Exoplanets...

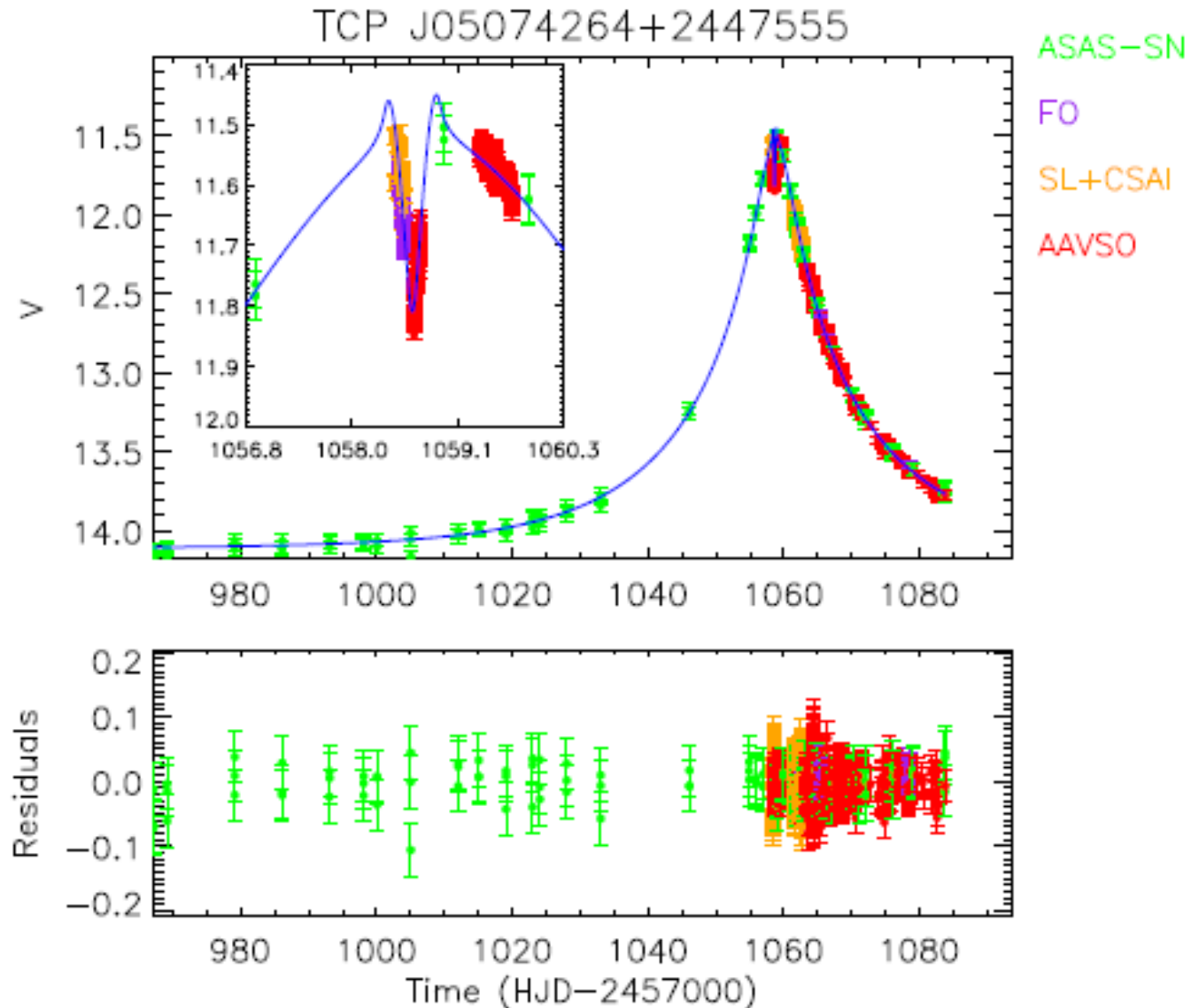
**web site: [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)**

**Today (November 2022):** 4868 exoplanets  
in 3595 planetary systems  
with 803 multiple planets

Transits: 3467 exoplanets, 2606 systems, 561 multiple planets  
Radial velocity: 979 exoplanets, 716 systems, 173 multiple planets  
Direct imaging: 155 exoplanets, 112 systems, 7 multiple planets  
Microlensing: 160 exoplanets, 143 systems, 7 multiple planets  
TTV: 24 exoplanets, 20 systems, 4 multiple planets  
Astrometry: 16 exoplanets, 5 systems, 0 multiple planets

# Light curve of TCP J05074264+2447555

(the closest planet discovered by gravitational microlensing)



# Binary system parameters of TCP J05074264+2447555

| Parameter               | Best Fit                                                         |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $q$                     | $(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-4}$                                   |
| $b$                     | $0.935 \pm 0.004$ ( <i>a</i> )<br>$0.975 \pm 0.004$ ( <i>b</i> ) |
| $T_0$ (reduced HJD)     | $1058.75 \pm 0.01$                                               |
| $t_E$ (days)            | $26.4 \pm 0.9$                                                   |
| $u_0$                   | $-0.093 \pm 0.001$                                               |
| $\theta$ (rad)          | $1.625 \pm 0.007$<br>$1.516 \pm 0.007$                           |
| $\rho_*$                | $(6.0 \pm 0.8) \times 10^{-3}$                                   |
| $f_s$                   | $> 0.93$                                                         |
| $V_0$                   | $14.11 \pm 0.01$                                                 |
| Reduced $\chi^2$ /d.o.f | 1.43/4080                                                        |

Nucita, Licchelli, De Paolis, Ingrosso, Strafella, Katysheva, Shugarov: “Discovery of a bright microlensing event with planetary features towards the Taurus region: a super-Earth planet”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476, 2962 (2018)

Source distance: 700 pc

Most likely lens distance: 380 pc

Source star mass: 0.25 solar mass

Planet mass: 3-16 Earth masses

# Einstein's sentence (2) is wrong



VLTI GRAVITY is an interferometric instrument operating in the K band, between 2.0 and 2.4  $\mu\text{m}$ . It combines 4 telescopes (with  $D=8.2$  m) beams: its angular resolution is equivalent to that of a 130 m telescope.

## FIRST RESOLUTION OF MICROLENSED IMAGES\*

SUNO DONG,<sup>1</sup> A. MÉRAND,<sup>2</sup> F. DELPLANCHE-STROEBLE,<sup>2</sup> ANDREW GOULD,<sup>3,4,5</sup> PING CHEN,<sup>2</sup> R. POST,<sup>6</sup>  
C. S. KOCHANER,<sup>6,7</sup> K. Z. STANKE,<sup>6,7</sup> G. W. CHRETIEN,<sup>8</sup> ROBERT MUTH,<sup>9</sup> T. NATUSEH,<sup>10</sup> T. W.-S. HOLOHEN,<sup>11</sup>  
J. L. PRINTE,<sup>12,13</sup> B. J. SHAPPER,<sup>14</sup> AND TODD A. THOMPSON<sup>6,7</sup>

<sup>1</sup>Kuoh Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Yi He Yuan Road 5, Hai Dian District, Beijing 100871, China

<sup>2</sup>European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Str. 2, 85748 Garching, Germany

<sup>3</sup>Max-Planck-Institute for Astronomy, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg, Germany

<sup>4</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daeseon 305-340, Republic of Korea

<sup>5</sup>Department of Astronomy Ohio State University, 140 W. 18th Ave., Columbus, OH 43210, USA

<sup>6</sup>Paul Observatory, Lexington, MA 02421

<sup>7</sup>Center for Cosmology and AstroParticle Physics (CCAPP), The Ohio State University, 181 W. Woodruff Avenue, Columbus, OH 43210, USA.

<sup>8</sup>Auckland Observatory, Box 24180, Auckland, New Zealand

<sup>9</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Iowa

<sup>10</sup>Institute for Radio Astronomy and Space Research, AUT University, Auckland, New Zealand

<sup>11</sup>The Observatories of the Carnegie Institution for Science, 813 Santa Barbara St., Pasadena, CA 91101, USA 0000-0001-8906-3460

<sup>12</sup>Núcleo de Astronomía de la Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Diego Portales, Av. Ejército 441, Santiago, Chile

<sup>13</sup>Millennium Institute of Astrophysics, Santiago, Chile

<sup>14</sup>Institute for Astronomy, University of Hawaii's, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA

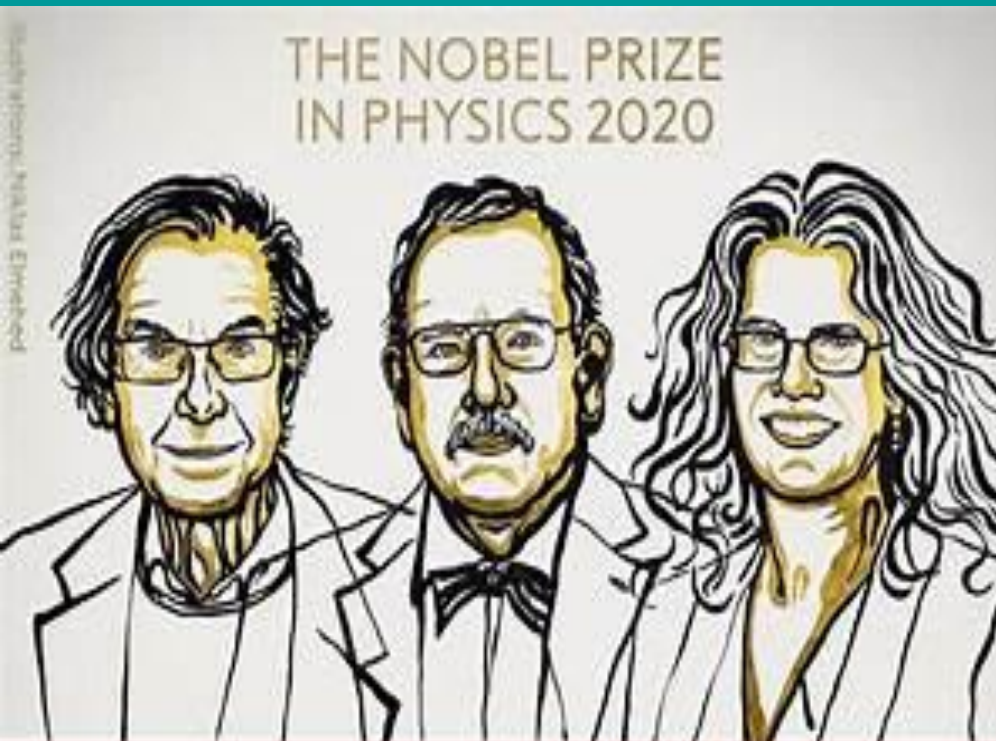
## ABSTRACT

We employ VLTI GRAVITY to resolve, for the first time, the two images generated by a gravitational microlens. The measurements of the image separation  $\theta_{\perp,i} = 3.78 \pm 0.05$  mas, and hence the Einstein radius  $\theta_E = 1.87 \pm 0.03$  mas, are precise. This demonstrates the robustness of the method, provided that the source is bright enough for GRAVITY ( $K \lesssim 10.5$ ) and the image separation is of order or larger than the fringe spacing. When  $\theta_E$  is combined with a measurement of the “microlens parallax”  $\pi_E$ , the two will together yield the lens mass and lens-source relative parallax and proper motion. Because the source parallax and proper motion are well measured by Gaia, this means that the lens characteristics will be fully determined, whether or not it proves to be luminous. This method can be a powerful probe of dark, isolated objects, which are otherwise quite difficult to identify, much less characterize. Our measurement contradicts Einstein’s (1936) prediction that “the luminous circle [i.e., microlensed image] cannot be distinguished” from a star.

**Keywords:** gravitational lensing: micro, techniques: interferometric

**Video by Achille Nucita posted on YouTube**

# BHs indeed exist!



Roger Penrose

"for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"

Reinhard Genzel

"for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy"

Andrea Ghez

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

First «picture» (April 10, 2019) of the BH in M87 by the Event Horizon Telescope (EHT)

[2020 Breakthrough Prize in Fundamental Physics shared among the 347 member of the EHT Collaboration]



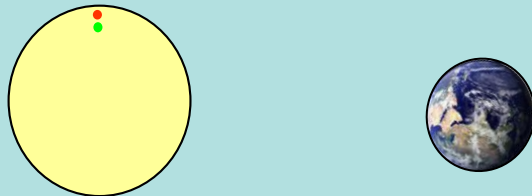
Gravity works just as the GR prediction, even at the very edge of a BH. Moreover, it is amazing we now have the technological capacity to test gravitational theories in ways we have never been able to do before.

If the lens is a BH, what happens to the deflection angle when photons get very close to it?

Holz and Wheeler, 2002, ApJ, 57, 330

Gravitational retro-lensing!

Einstein could not imagine that since he did not believe in BH existence.



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 578:330–334, 2002 October 10  
© 2002. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## RETRO-MACHOS: $\pi$ IN THE SKY?

DANIEL E. HOLZ

Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, CA 93106

AND

JOHN A. WHEELER

Department of Physics, Princeton University, Princeton, NJ 08544

Received 2002 May 21; accepted 2002 June 20

### ABSTRACT

Shine a flashlight on a black hole, and one is greeted with the return of a series of concentric rings of light. For a point source of light, and for perfect alignment of the lens, source, and observer, the rings are of infinite brightness (in the limit of geometric optics). In this manner, distant black holes can be revealed through their reflection of light from the Sun. Such retro-MACHO events involve photons leaving the Sun, making a  $\pi$  rotation about the black hole, and then returning to be detected at the Earth. Our calculations show that although the light return is quite small, it may nonetheless be detectable for stellar-mass black holes at the edge of our solar system. For example, all (unobscured) black holes of mass  $M$  or greater will be observable to a limiting magnitude  $\bar{m}$ , at a distance given by  $d \approx 1.5 \times 10^4 (M/M_\odot)^{1/2}$  pc. Retro-MACHOs offer a way to directly image the presence of black holes in the solar system. This is a new application of general relativity.

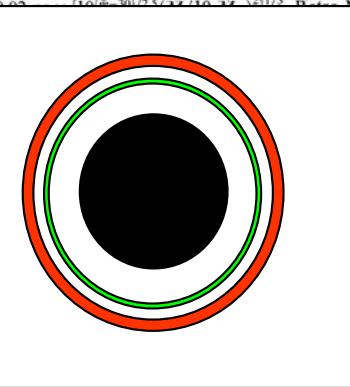
*Subject headings:* black hole physics — gravitation — solar system — Sun — Sun: general

*On-line material:* color figures

### 1. INTRODUCTION

In the discovery of MACHOs, light has shown its power to reveal dark compact objects. In the events, the light from a distant source suffers a very small angular deflection, small enough to make gravitational lensing the relevant mechanism. The bending power of a black hole is not limited to small angles but reaches  $\pi$  and odd multiples of  $\pi$ . Illuminated by a powerful point source of light, the black hole will therefore shine back with a series of concentric rings (we call this retrolensing). A water droplet, likewise illuminated, shines back, but for a different reason: the internal reflections experienced by the photons. Returned light shows to the air traveler flying over a fog as a “glory”: a rainbow-like halo surrounding the shadow of the plane on the cloud. Each ray of light that contributes to this sensation has suffered its  $\pi$  deflection in a different water drop; therefore, the impression of colored rings that the glory makes is impression only built up in the last analysis out of multitudes of tiny dots of illumination. No one would be so rash as to expect a detectable backscatter from a single water droplet. It is precisely the search for such backscatter from a single black hole (the putative retro-MACHO) that is, however, the topic of this paper.

How does one search for retro-MACHOs, for “ $\pi$  in the sky,” especially when dogged by the negative implications of the familiar phrase? To tell observers to go and look everywhere is to them as dismaying as to be told to look nowhere. Fortunately, the successful search for MACHOs provides a helpful model, and the records from that search are an immediate point of reference. Recent microlensing events appear to directly confirm that a population of stellar-mass black holes exists in our Galaxy (Bennett et al. 2002; Mao et al. 2002; Agol et al. 2002). The Sun, in turn, furnishes a powerful nearby source with whose help one can hope to search a nearby region of the Galaxy for black holes not otherwise revealed, taking advantage of times when the



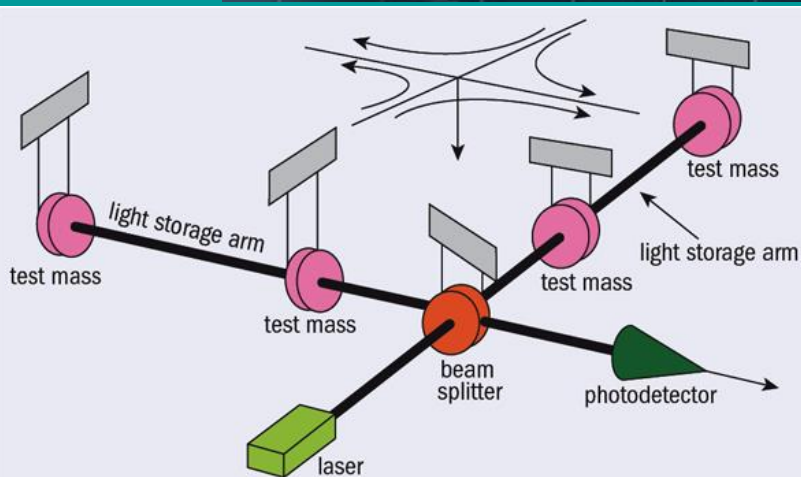
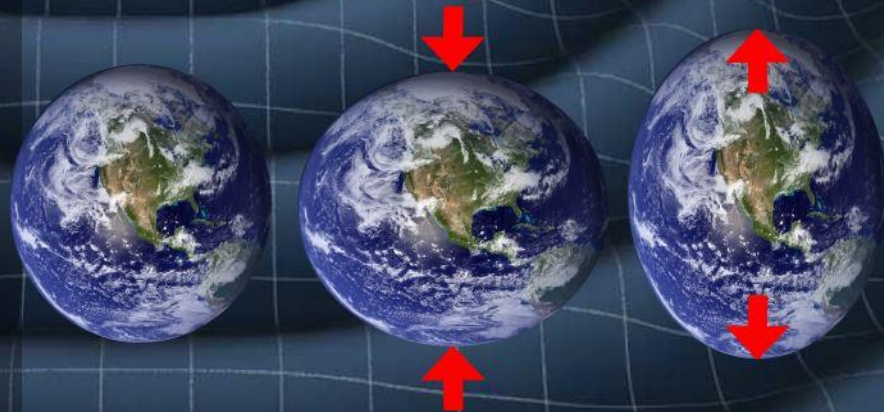
the image of the source in the black hole, will see (resulting from symmetry) an (infinite) series of concentric rings, corresponding to bending angles of successively higher odd multiples of  $\pi$ . The outermost ring would be from photons suffering a  $\pi$  deflection, the next inner ring corresponding to a  $3\pi$  deflection, and so on. For a point source, and in the limit of geometric optics, the amplification of the rings is infinite. For realistic scenarios with extended sources, however, the amplification is finite. For example, consider an extended spherically symmetric source emitting uniformly across its surface. The image of the source at the observer is an annulus, where the outer and inner radii correspond to the appropriate impact parameters for photons coming from the top and bottom parts of the source, as shown in Figure 1. Because lensing conserves surface brightness, the brightness of the ring image relative to that of the source is given by the ratio of the areas of the images, as seen at the observer.

The fraction of the sky covered by the ring image is given by

$$A_I = \frac{\pi b_o^2 - \pi b_L^2}{4\pi D_{OL}^2}, \quad (1)$$

## WHAT ARE GRAVITATIONAL WAVES?

Gravitational distortion of space-time occurs when massive objects such as black holes collide and merge. The waves squeeze and stretch space as they pass, but the effect is subatomically small. (The effect of stretching due to passing gravitational waves is hugely magnified in the globes at right.)



**Come vengono rivelate le onde gravitazionali?  
Con gli interferometri laser.**

# Premio Nobel per la Fisica 2017

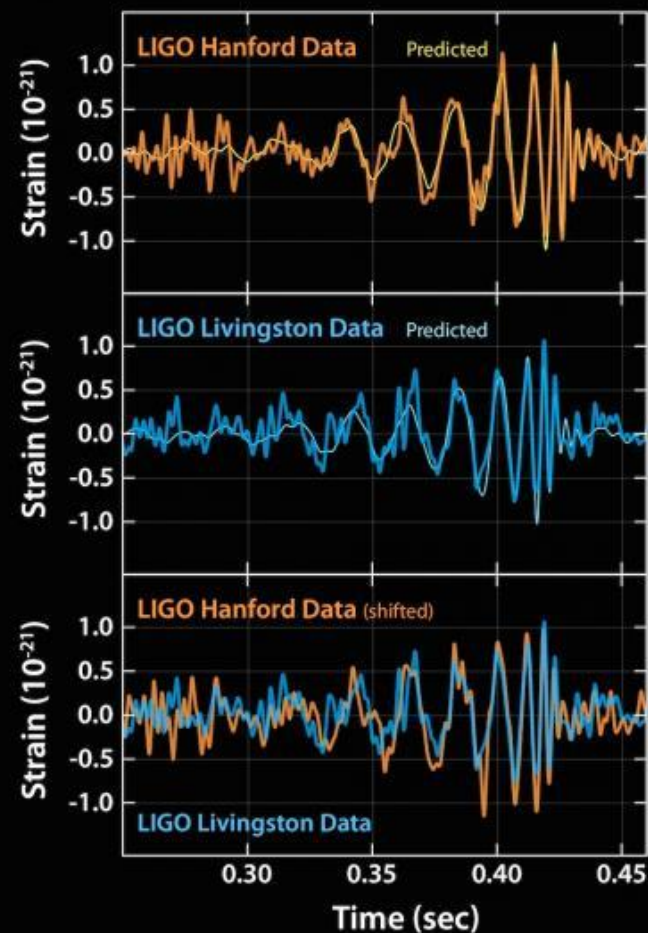
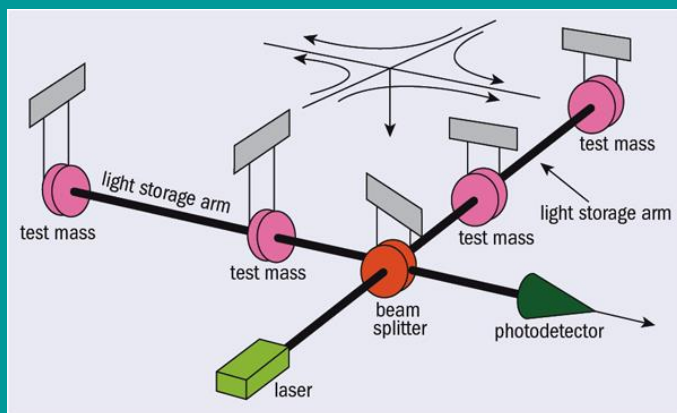


2017 Nobel Prize in Physics

**A Barry Barish, Kip Thorne e Ray Weiss  
per la scoperta delle onde gravitazionali**

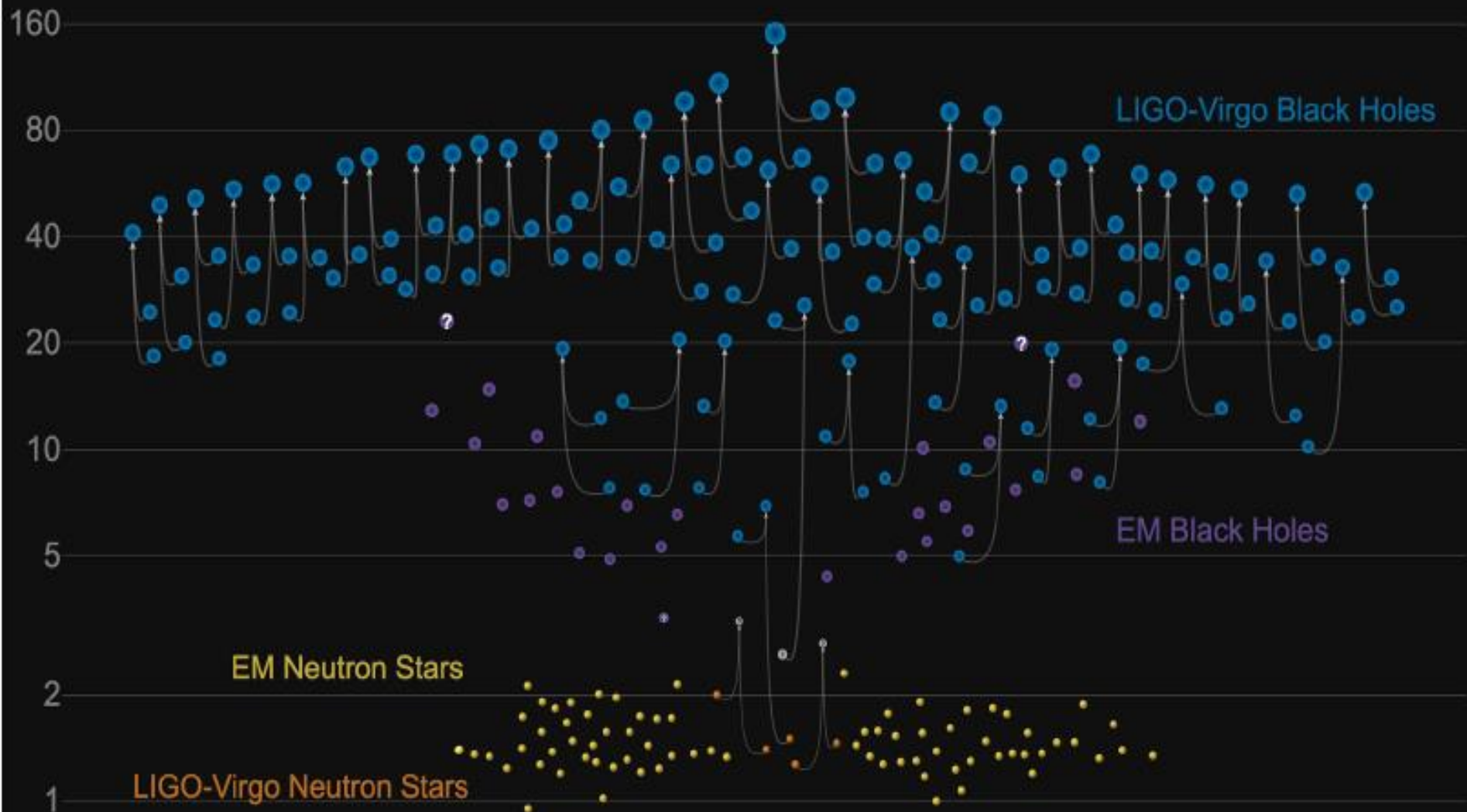
**Nasce una nuova era (come quando  
Galileo puntò il telescopio al cielo):  
l'astronomia multimessenger**

GW 150914



# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



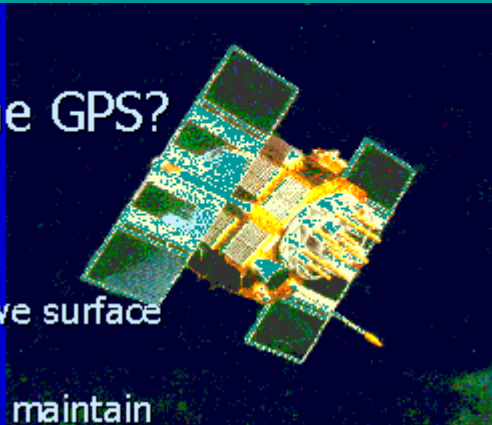
GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

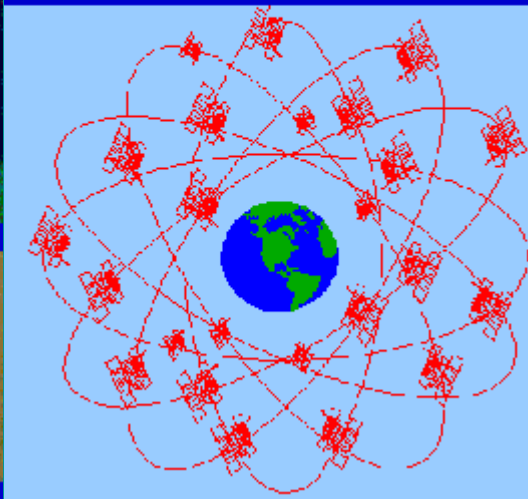
# Un'applicazione pratica della relatività: il GPS

## What is the GPS?

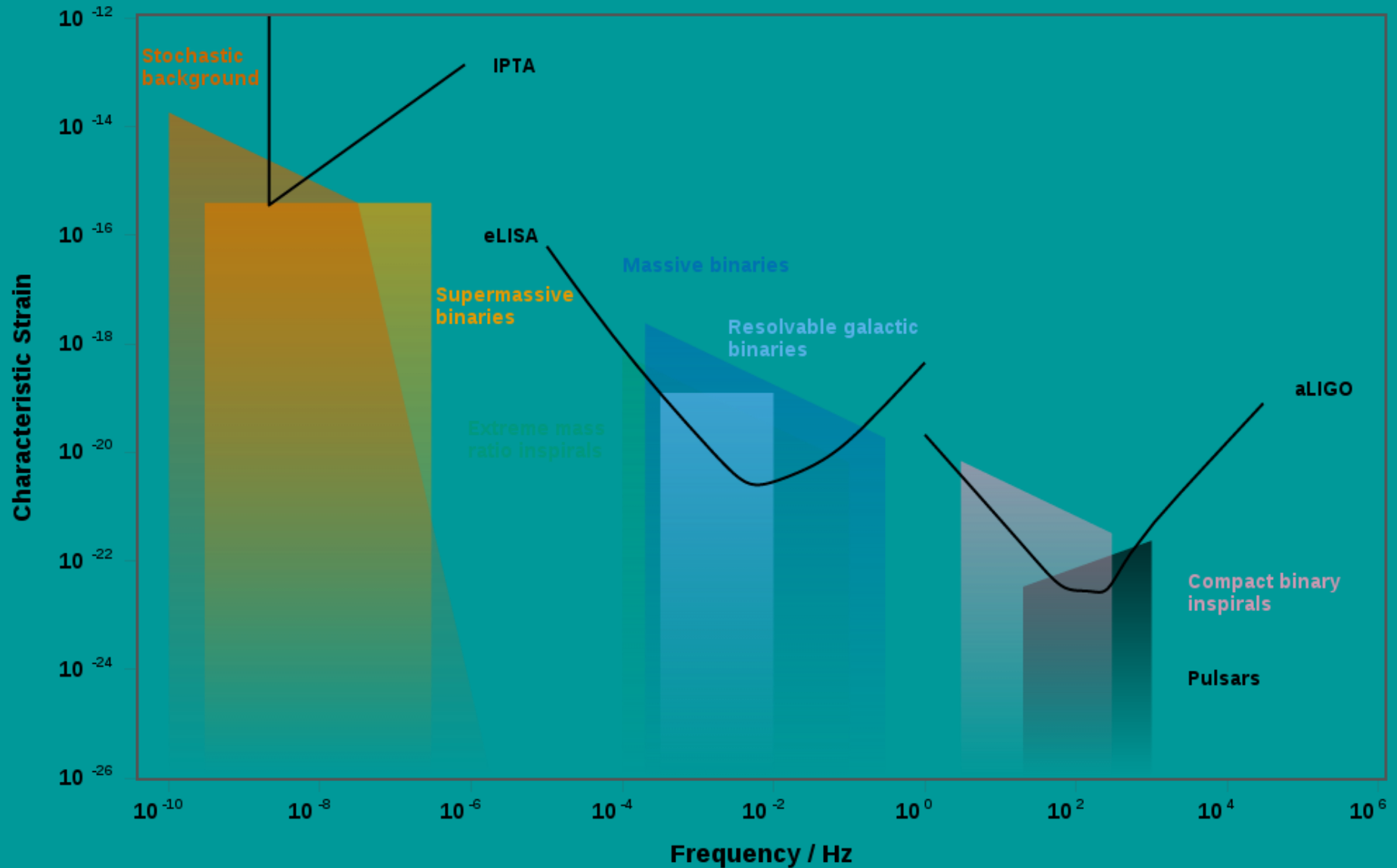
- Array of 24 satellites
- In orbit 20,000 km above surface of Earth (12 hr orbit)
- Ground station in US to maintain system
- Satellites broadcast accurate time signals
- Hand held receiver can locate your position to phenomenal accuracy



## What is the GPS?

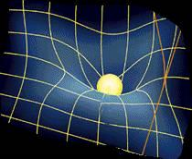


# Gravitational-wave sensitivity-curve and pulsar timing arrays (PTAs)



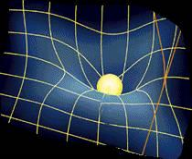
# Conclusioni

- Gli scienziati che abbiamo incontrato hanno cambiato per sempre la nostra concezione dell'universo e abbiamo capito di non comprendere molte cose. Le grandi scoperte aprono sempre più domande che risposte!
- La storia, per quanto straordinaria, non sembra però completa: ci sono diversi aspetti nell'universo per i quali la relatività generale non è in grado di fornire una descrizione accurata: che cosa accade vicino e all'interno di un buco nero (in particolare vicino alla singolarità) dove gli effetti quantistici devono essere rilevanti, quali meccanismi entrano in gioco nei primi istanti di vita dell'universo, cosa determina l'espansione accelerata dell'universo?



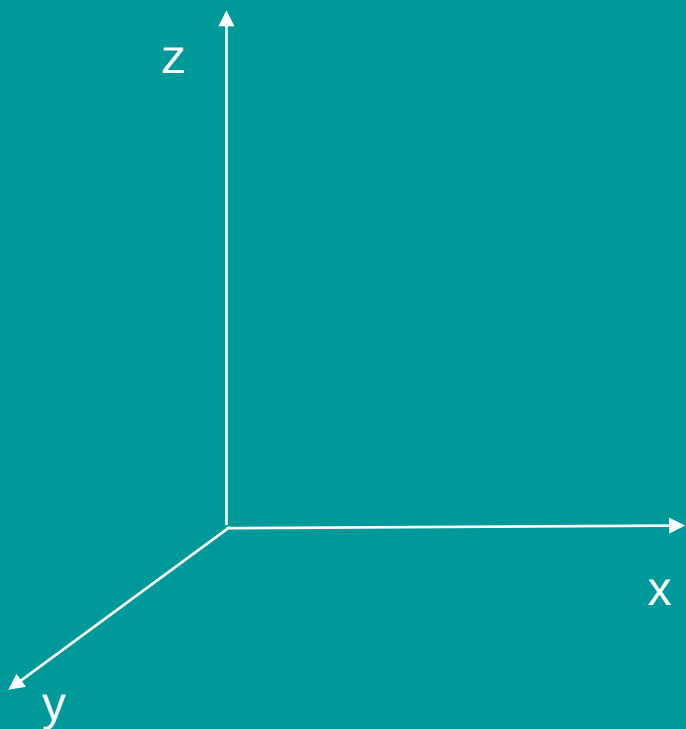
## **Appendice: spazio-tempo nella relatività ristretta**

La fisica Newtoniana ha la caratteristica di attribuire una effettiva esistenza indipendente tanto allo spazio e al tempo che alla materia. Nella legge del moto di Newton compare infatti il concetto di accelerazione...ma in questa teoria la definizione di accelerazione ha senso solo se essa e' riferita rispetto a qualcosa...e questo “qualcosa” e' lo spazio!

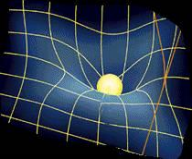


## SISTEMA DI RIFERIMENTO

$$RO \equiv (x, y, z)$$



Lo scopo della meccanica e' di  
descrivere in qual modo i corpi  
mutano col “**tempo**” la propria  
posizione nello spazio!



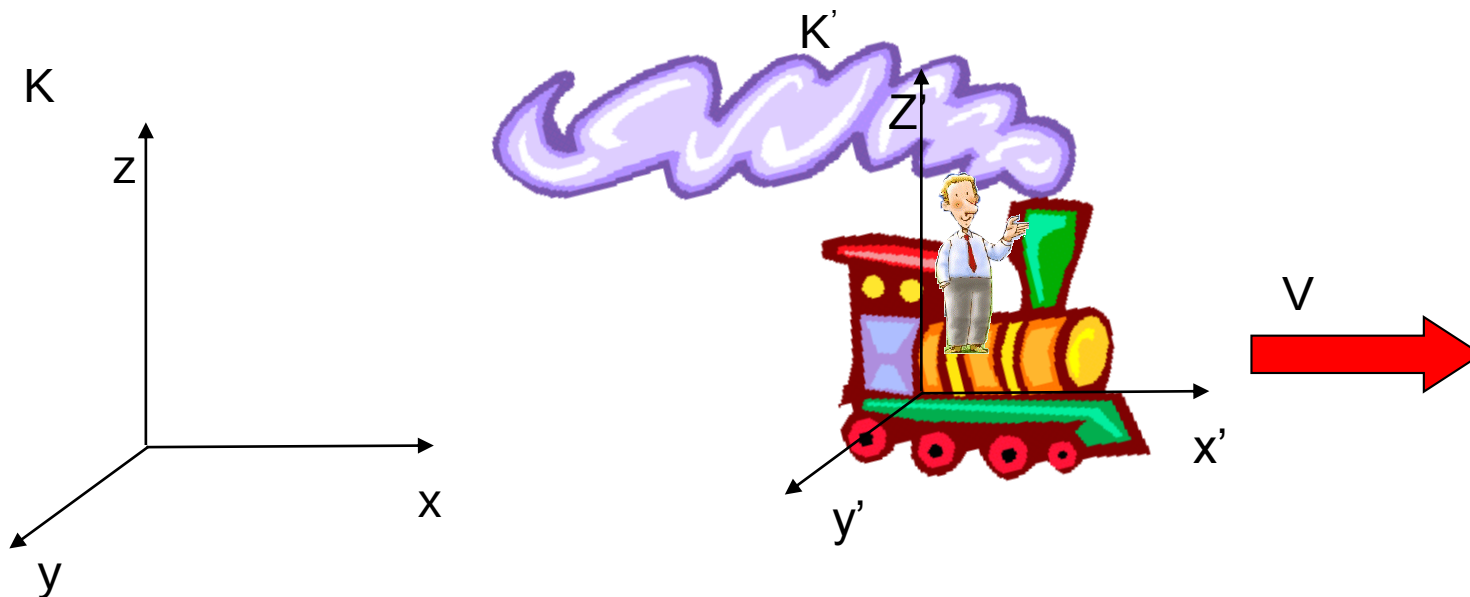
# Relatività Galileiana: legge della somma delle velocità

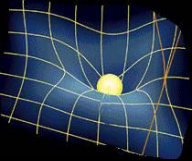
$V$  velocità del treno rispetto al sistema  $K$

$v'$  di Albert rispetto al Treno (sistema  $K'$ )



$$v = v' + V$$





# Relatività Galileiana: Trasformazioni di Galileo

$$x' = x - v t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Permettono di passare da un sistema K ad un sistema K' in moto relativo traslatorio uniforme.

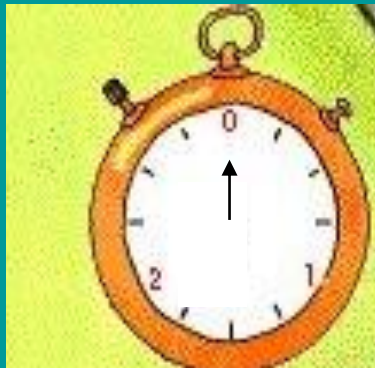
$$\frac{dx'}{dt} = \frac{d}{dt}(x - Vt)$$

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{V}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{V}$$

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a}$$

# Gedankenexperiment: come vedrei l'universo a bordo di un raggio di luce?



Già prima del 1905 si sapeva che la luce si propagava a 300000 km/s, ma si pensava che in linea di principio fosse possibile raggiungere e superare questa velocità! I ragionamenti di Einstein portarono ad una rivoluzione concettuale dei fondamenti stessi della fisica e della nostra concezione dello spazio-tempo.

# I postulati di Einstein

- ***1° Principio della relatività:***

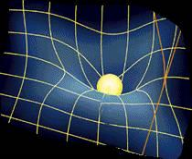
Le leggi della fisica sono identiche in tutti i sistemi di riferimento inerziali (non esiste un sistema di riferimento privilegiato)

...non ci si può rendere conto da misure locali se il sistema di riferimento si muove o meno rispetto ad un altro sistema di riferimento inerziale.

- ***2° Postulato della velocità della luce:***

La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore  $c$  in tutte le direzioni e in tutti i sistemi di riferimento inerziali



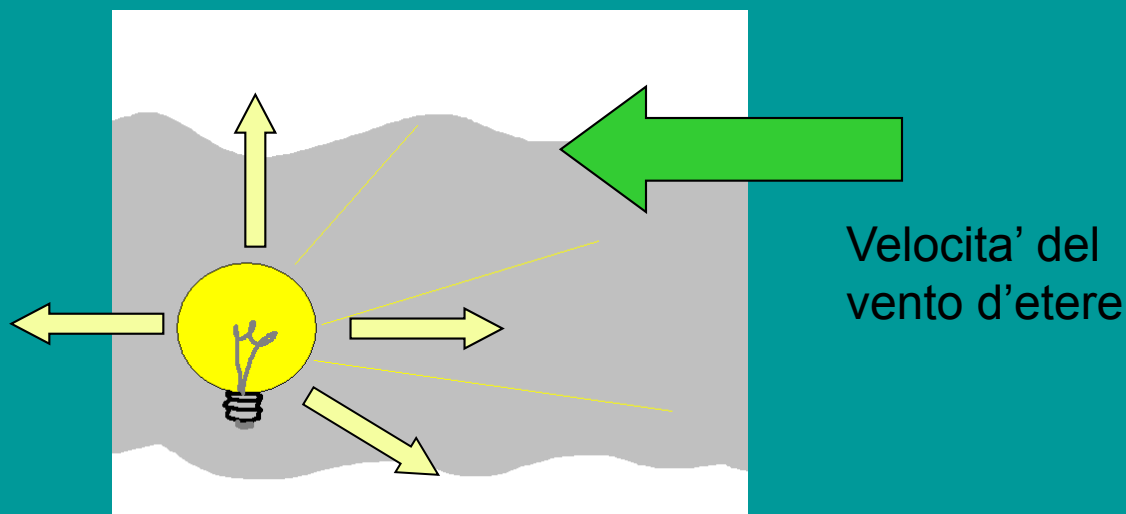


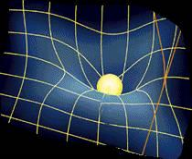
# Relatività Ristretta: LA STORIA!

Nel primo quarto del diciannovesimo secolo divenne palese che la luce, essendo un'onda, doveva propagarsi in un mezzo.

Doveva esistere qualcosa (l'etere) che permeava lo spazio!

Ma come si comportava l'etere in relazione ai corpi ponderabili? Partecipava al moto dei corpi?





# Relatività Ristretta: LA STORIA!

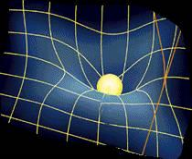
## Esperimento di Michelson e Morley

**VirLab**  
**LABORATORIO**

L'esperimento di Michelson e Morley  
Come funziona?

passa sugli oggetti per vederne una descrizione, oppure fai clic per vedere come funzionano.

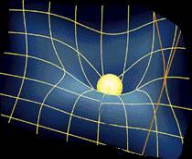
esperimento



# Relatività Ristretta: gli orologi rallentano!

L'orologio di Einstein (la concezione del tempo dipende dallo stato di moto dell'osservatore)

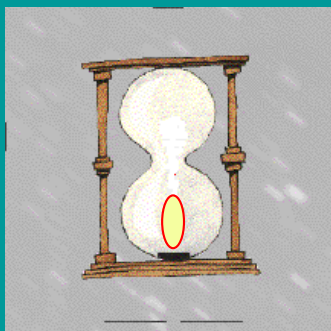




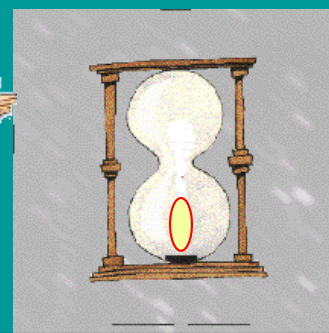
# Relatività Ristretta: gli orologi rallentano!

Vediamo che cosa succede se l'orologio e' in movimento. Cosa deduce un osservatore solidale ed un osservatore in moto?

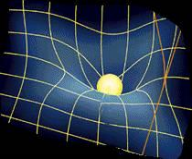
K



K'



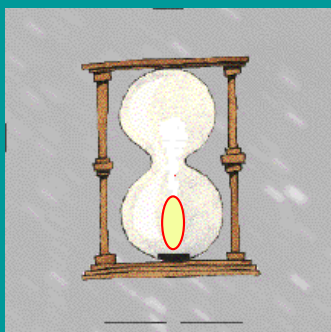
Poiche' i due osservatori sono in quiete l'uno rispetto all'altro, per essi i due orologi sono esattamente sincronizzati.



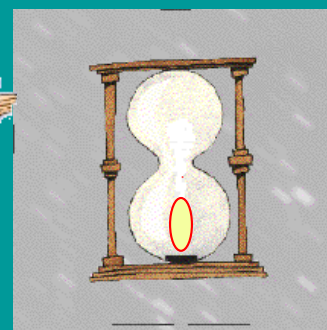
# Relatività Ristretta: gli orologi rallentano!

Vediamo che cosa succede se l'orologio e' in movimento. Cosa deduce un osservatore solidale ed un osservatore che vede l'orologio muoversi?

**K**



**K'**



**v**



$t < t'$

**PERCHE'?**

# Relatività del tempo

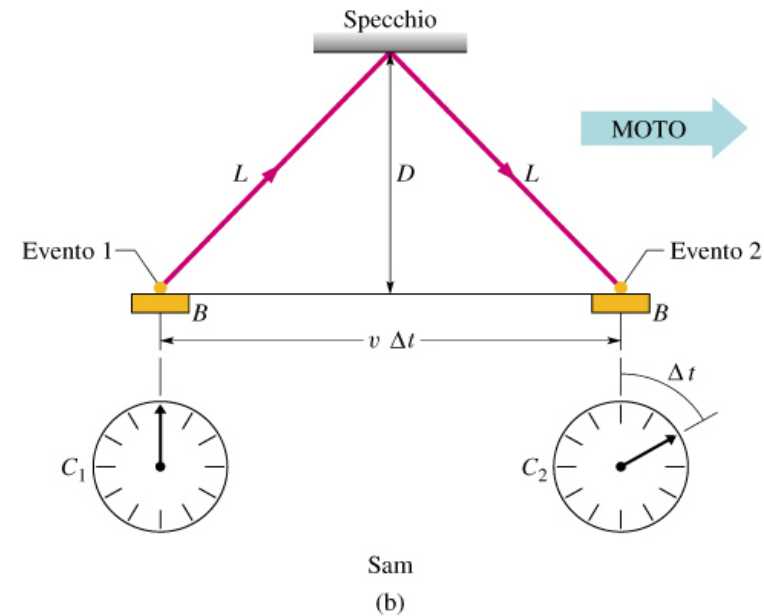
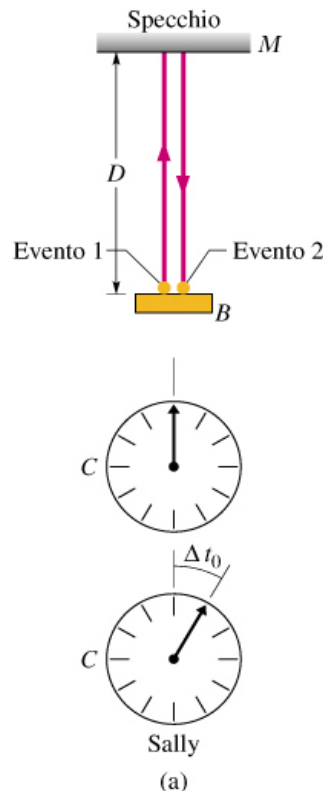
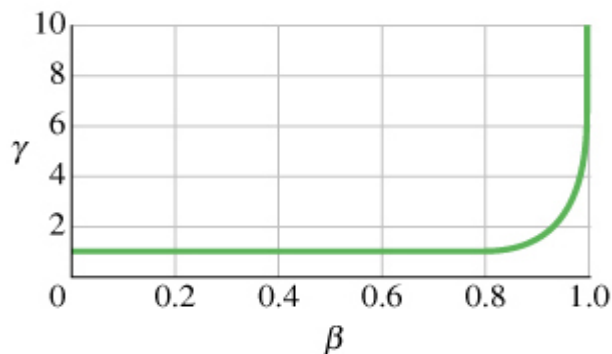
Sally, in moto su un treno a velocità  $v$ , invia un raggio da B verso lo specchio e misura in tempo l'intercorso tra invio e rilevazione su B, ottenendo  $\Delta t_0 = 2D/c$ .

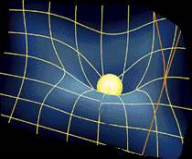
Sam, in stazione, misura (con 2 orologi) il tempo  $\Delta t$  necessario affinché il raggio percorra il tratto  $2L$  ( $L > D$ ). Per lui  $\Delta t = 2L/c$  e siccome

$$L = \sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + D^2} = \sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2} \quad \text{si ottiene:}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \gamma \Delta t_0 \quad \text{con} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

**(dilatazione dei tempi).** La grandezza  $\Delta t_0$  (intervallo di tempo misurato tra due eventi che accadono nello stesso luogo con quel particolare sistema di riferimento) è chiamata **tempo proprio**.

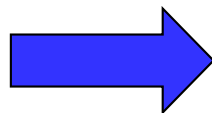




# Relatività Ristretta: trasformazioni di Lorentz

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

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



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

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Supponiamo che Bruno e Mauro siano due gemelli e che quando hanno 25 anni Bruno voli per  $t=10$  anni misurato sulla navicella spaziale con velocità  $v = 0,98c$

Per la relazione che lega il tempo nei due sistemi di riferimento per Mauro sarà passato un :

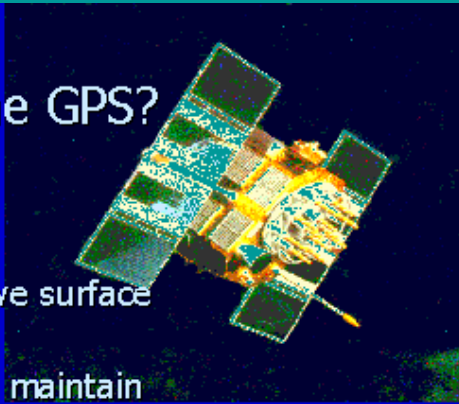
$$\Delta t = \frac{10}{\sqrt{1-(0,98)^2}} = 50 \text{anni}$$

Quindi al termine del volo Bruno avrà solo 35 anni mentre Mauro ne avrà 75 cioè Mauro sarà più vecchio di Bruno



## What is the GPS?

- Array of 24 satellites
- In orbit 20,000 km above surface of Earth (12 hr orbit)
- Ground station in US to maintain system
- Satellites broadcast accurate time signals
- Hand held receiver can locate your position to phenomenal accuracy



## What is the GPS?

