

# La Relatività Generale all'esame degli esperimenti: dalla deflessione della luce all'esperimento AEGIS

**Davide Pagano**  
Università degli Studi di Brescia

- Quest'anno ricorre il centenario della Relatività Generale (RG), uno dei più importanti successi della Fisica moderna (e non solo...)

- Quest'anno ricorre il centenario della Relatività Generale (RG), uno dei più importanti successi della Fisica moderna (e non solo...)
- Tuttavia fino agli anni '50 la RG era riguardata solo come un elegante formalismo matematico che non aveva molto a che fare con la realtà

- Quest'anno ricorre il centenario della Relatività Generale (RG), uno dei più importanti successi della Fisica moderna (e non solo...)
- Tuttavia fino agli anni '50 la RG era riguardata solo come un elegante formalismo matematico che non aveva molto a che fare con la realtà
- Per lo stesso Einstein (almeno inizialmente) la verifica sperimentale della RG rappresentava un «problema secondario»

- Quest'anno ricorre il centenario della Relatività Generale (RG), uno dei più importanti successi della Fisica moderna (e non solo...)
- Tuttavia fino agli anni '50 la RG era riguardata solo come un elegante formalismo matematico che non aveva molto a che fare con la realtà
- Per lo stesso Einstein (almeno inizialmente) la verifica sperimentale della RG rappresentava un «problema secondario»
- Tanto da dichiarare che se le misure sulla deflessione della luce fossero state in disaccordo con la teoria...

«feel sorry for the dear Lord,  
for the theory is correct!»

- Nonostante Einstein fosse diventato celebre a partire dagli anni '20
  - il pieno riconoscimento della RG arriva a partire dagli anni '60
  - grazie a nuove scoperte (quasar, pulsar, etc...) e spettacolari verifiche sperimentali di alcune previsioni della RG

- Nonostante Einstein fosse diventato celebre a partire dagli anni '20
  - il pieno riconoscimento della RG arriva a partire dagli anni '60
  - grazie a nuove scoperte (quasar, pulsar, etc...) e spettacolari verifiche sperimentali di alcune previsioni della RG
- In questo seminario vedremo alcune di queste verifiche sperimentali
  - **le prove classiche** (perielio di Mercurio, deflessione della luce...)
  - **le onde gravitazionali**
  - **i test sul Principio di Equivalenza**

- Nonostante Einstein fosse diventato celebre a partire dagli anni '20
  - il pieno riconoscimento della RG arriva a partire dagli anni '60
  - grazie a nuove scoperte (quasar, pulsar, etc...) e spettacolari verifiche sperimentali di alcune previsioni della RG

- In questo seminario vedremo alcune di queste verifiche sperimentali
  - **le prove classiche** (perielio di Mercurio, deflessione della luce...)
  - **le onde gravitazionali**
  - **i test sul Principio di Equivalenza**

- L'ultima parte del seminario è dedicata all'esperimento AEgIS al CERN
  - test del principio di equivalenza (debole) con l'antimateria
- l'Università di Brescia partecipa attivamente all'esperimento

- La Relatività Generale si basa su tre *idee* fondamentali:

- La Relatività Generale si basa su tre *idee* fondamentali:

## Principio di Equivalenza

(localmente) Un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è equivalente ad un riferimento inerziale

- La Relatività Generale si basa su tre *idee* fondamentali:

## Principio di Equivalenza

(localmente) Un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è equivalente ad un riferimento inerziale

La materia incurva lo spazio-tempo

- La Relatività Generale si basa su tre *idee* fondamentali:

## Principio di Equivalenza

(localmente) Un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è equivalente ad un riferimento inerziale

La materia incurva lo spazio-tempo

Il moto di un corpo nello spazio (curvo) è una *geodetica*

- La Relatività Generale si basa su tre *idee* fondamentali:

## Principio di Equivalenza

(localmente) Un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è equivalente ad un riferimento inerziale

La materia incurva lo spazio-tempo

Il moto di un corpo nello spazio (curvo) è una *geodetica*

**J. Wheeler** «**La materia dice allo spazio-tempo come incurvarsi, e lo spazio curvo dice alla materia come muoversi**»

- La Relatività Generale si basa su tre *idee* fondamentali:

## Principio di Equivalenza

(localmente) Un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è equivalente ad un riferimento inerziale

La materia incurva lo spazio-tempo

Il moto di un corpo nello spazio (curvo) è una *geodetica*

**J. Wheeler** «**La materia dice allo spazio-tempo come incurvarsi, e lo spazio curvo dice alla materia come muoversi**»

- È una teoria complessa sia matematicamente che concettualmente

- E ha “favorito” il proliferare di teorie pseudo-scientifiche alternative...

## Evangelical Scientists Refute Gravity With New 'Intelligent Falling' Theory

NEWS

August 17, 2005

VOL 41 ISSUE 33

Science & Technology ·  
Science · Christianity

KANSAS CITY, KS—As the debate over the teaching of evolution in public schools continues, a new controversy over the science curriculum arose Monday in this embattled Midwestern state. Scientists from the Evangelical Center For Faith-Based Reasoning are now asserting that the long-held "theory of gravity" is flawed, and they have responded to it with a new theory of Intelligent Falling.



Rev. Gabriel Burdett explains Intelligent Falling.

"Things fall not because they are acted upon by some gravitational force, but because a higher intelligence, 'God' if you will, is pushing them down," said Gabriel Burdett, who holds degrees in education, applied Scripture, and physics from Oral Roberts University.

Burdett added: "Gravity—which is taught to our children as a law—is founded on great gaps in understanding. The laws predict the mutual force between all bodies of mass, but they cannot explain that force. Isaac Newton himself said, 'I suspect that my theories may all depend upon a force for which philosophers have searched all of nature in vain.' Of course, he is alluding to a higher power."

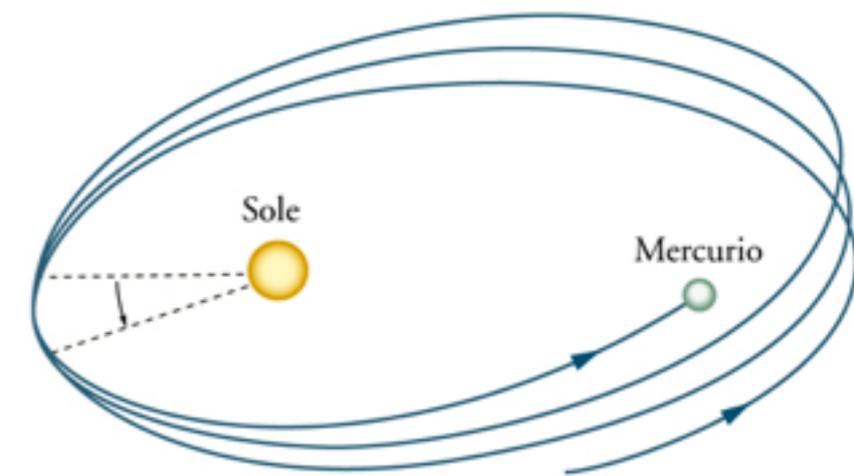
### MOST POPULAR

[SEE ALL](#)

- 1 Smiling Nation Takes Moment To Enjoy Thought Of What RNC Headquarters Like Right Now
- 2 Bin Laden's Personal Documents Made Public
- 3 Sanders Campaign Headquarters Smashed Up By Gang Of Pinkerton Union Busters
- 4 Audubon Society Reveal They've Only Seen, Like, 3 Birds
- 5 GOP Statisticians Develop New Branch Of Math To Formulate Scenarios In Which Trump Doesn't Win Nomination

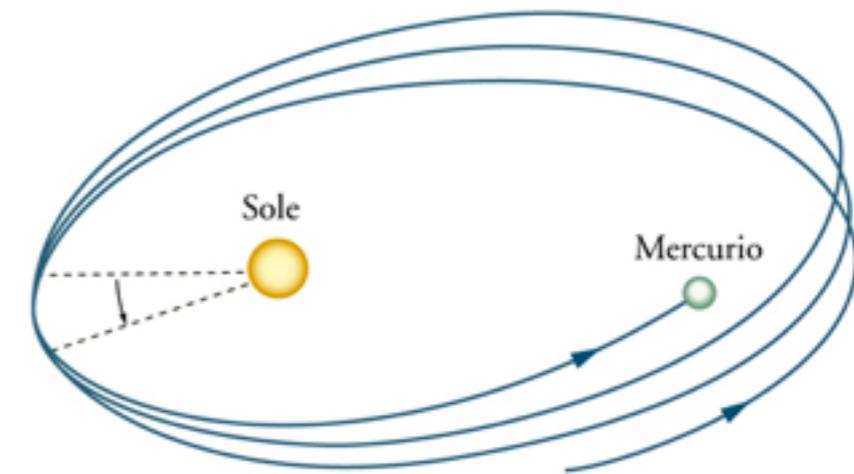
# Le verifiche “classiche” della Relatività Generale

- Il perielio di un pianeta si sposta nel tempo
  - È un fenomeno previsto dalla teoria della gravitazione di Newton
  - Mercurio è il pianeta per il quale l'effetto è più evidente



- Il perielio di un pianeta si sposta nel tempo
  - È un fenomeno previsto dalla teoria della gravitazione di Newton
  - Mercurio è il pianeta per il quale l'effetto è più evidente
- **1850, Le Verrier:** il perielio di Mercurio avanza più velocemente di quanto predetto dalla teoria

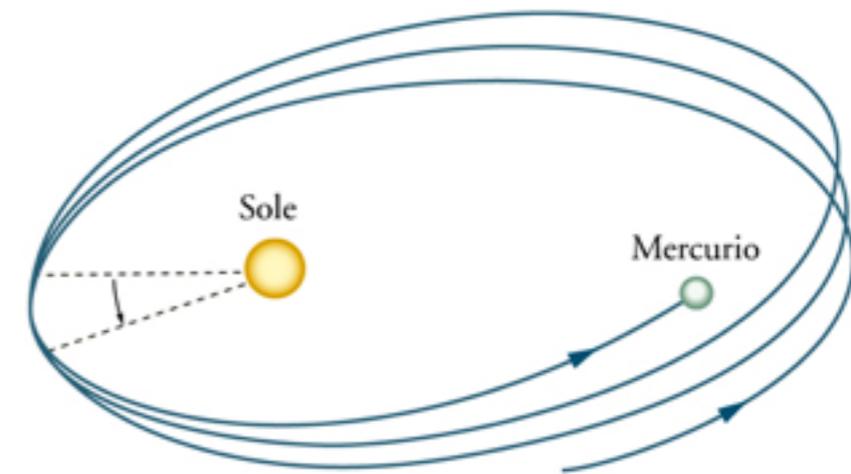
43"/secolo più velocemente...



- Il perielio di un pianeta si sposta nel tempo
  - È un fenomeno previsto dalla teoria della gravitazione di Newton
  - Mercurio è il pianeta per il quale l'effetto è più evidente

- **1850, Le Verrier:** il perielio di Mercurio avanza più velocemente di quanto predetto dalla teoria

43"/secolo più velocemente...



- Il pianeta “Vulcano” tra il Sole e Mercurio?
- Venere è in realtà il 10% più pesante di quanto si pensasse?
- $1/r^{2.0000001574}$ ?

- **1915, Einstein:** l'avanzamento del perielio di Mercurio è in accordo con le previsioni della RG
- Fine della storia...o no?

- **1915, Einstein:** l'avanzamento del perielio di Mercurio è in accordo con le previsioni della RG

- Fine della storia...o no?

- Lo schiacciamento del Sole potrebbe spiegare la precessione del perielio di Mercurio senza il bisogno di scomodare la RG...

$$S = \frac{R_{eq} - R_p}{R_{eq}} = 9 \times 10^{-6}$$

- Prime misure alla fine degli anni '60 (poco precise)

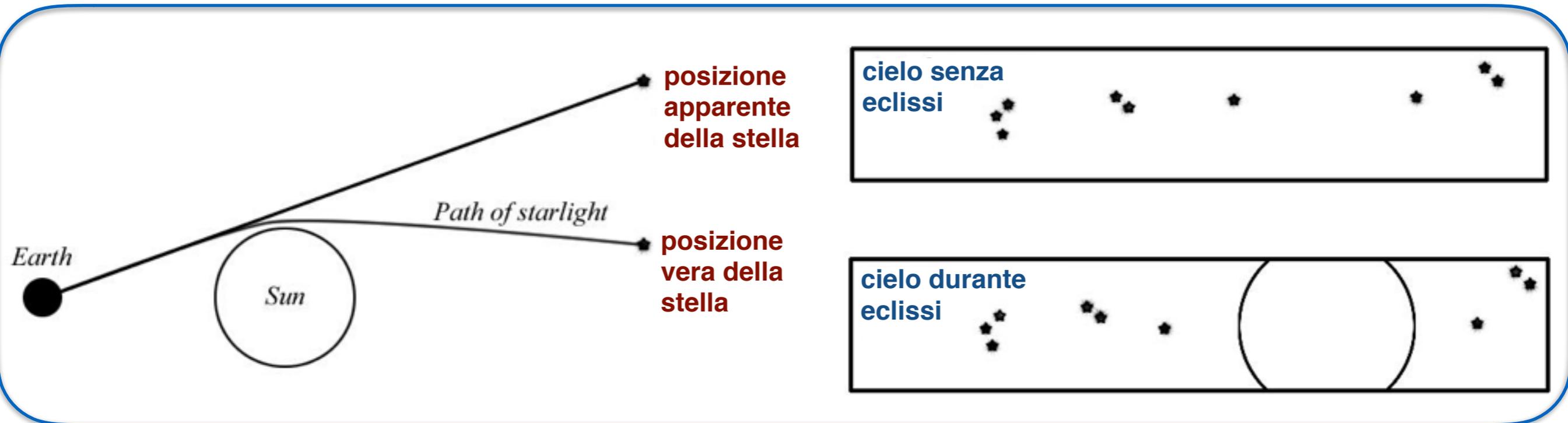
- **Anni '80:** misure di oscillazioni solari (dipendenti dallo schiacciamento), hanno mostrato che il suo contributo è trascurabile

- L'idea che la luce possa risentire di un campo gravitazionale era già stato notato da **Cavendish** nel 1784 (modello corpuscolare della luce)

- L'idea che la luce possa risentire di un campo gravitazionale era già stato notato da **Cavendish** nel 1784 (modello corpuscolare della luce)
- **Soldner** nel 1804 calcola la deflessione della luce radente al Sole:  $0.88''$

- L'idea che la luce possa risentire di un campo gravitazionale era già stato notato da **Cavendish** nel 1784 (modello corpuscolare della luce)
- **Soldner** nel 1804 calcola la deflessione della luce radente al Sole: 0.88''
- Einstein nel 1915 calcola la geodetica percorsa dalla luce nello spazio-tempo incurvato dal Sole e arriva al risultato "giusto": 1.77''

- L'idea che la luce possa risentire di un campo gravitazionale era già stato notato da **Cavendish** nel 1784 (modello corpuscolare della luce)
- **Soldner** nel 1804 calcola la deflessione della luce radente al Sole: 0.88''
- Einstein nel 1915 calcola la geodetica percorsa dalla luce nello spazio-tempo incurvato dal Sole e arriva al risultato "giusto": 1.77''



- **Arthur Eddington** nel 1919 si reca a São Tomé e Príncipe per assistere ad all'eclissi totale di sole

- **Arthur Eddington** nel 1919 si reca a São Tomé e Príncipe per assistere ad all'eclissi totale di sole



- **Arthur Eddington** nel 1919 si reca a São Tomé e Príncipe per assistere ad all'eclissi totale di sole
- Eddington fece numerose fotografie
  - di bassa qualità a causa delle condizioni meteo
  - usando anche (**una parte**) dati acquisiti in contemporanea in Brasile annuncia che la deflessione è in accordo con le previsioni di Einstein



- **Arthur Eddington** nel 1919 si reca a São Tomé e Príncipe per assistere ad all'eclissi totale di sole

- Eddington

- di ba
- usan
- annur

**REVOLUTION IN SCIENCE  
NEW THEORY OF THE UNIVERSE  
NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN**

*London Times of November 7, 1919*



Brasile  
Einstein

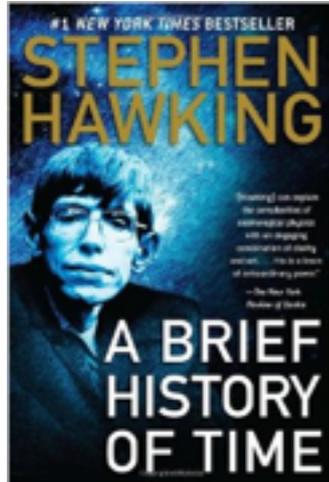
- **Arthur Eddington** nel 1919 si reca a São Tomé e Príncipe per assistere ad all'eclissi totale di sole
- Eddington fece numerose fotografie
  - di bassa qualità a causa delle condizioni meteo
  - usando anche (**una parte**) dati acquisiti in contemporanea in Brasile annuncia che la deflessione è in accordo con le previsioni di Einstein
- La notizia fa il giro del mondo e rende celebre Einstein
  - l'annuncio viene celebrato con una **ticker tape parade** a New York
  - caso unico nella storia della Scienza



- **Arthur Eddington** nel 1919 si reca a São Tomé e Príncipe per assistere ad all'eclissi totale di sole
- Eddington fece numerose fotografie
  - di bassa qualità a causa delle condizioni meteo
  - usando anche (**una parte**) dati acquisiti in contemporanea in Brasile annuncia che la deflessione è in accordo con le previsioni di Einstein
- La notizia fa il giro del mondo e rende celebre Einstein
  - l'annuncio viene celebrato con una **ticker tape parade** a New York
  - caso unico nella storia della Scienza
- Fine della storia?

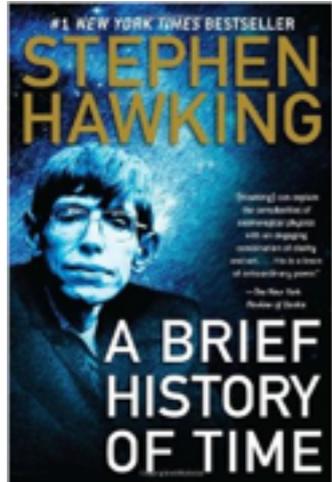


- I risultati di Eddington sono stati successivamente aspramente criticati



***"Their measurement had been sheer luck, or a case of knowing the result they wanted to get."***

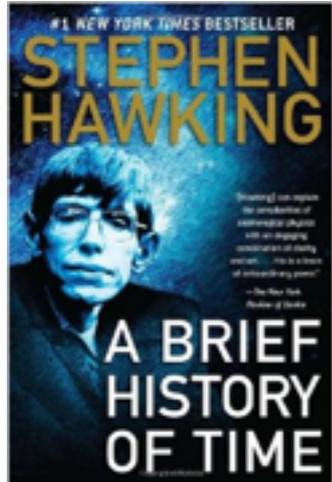
- I risultati di Eddington sono stati successivamente aspramente criticati



***"Their measurement had been sheer luck, or a case of knowing the result they wanted to get."***

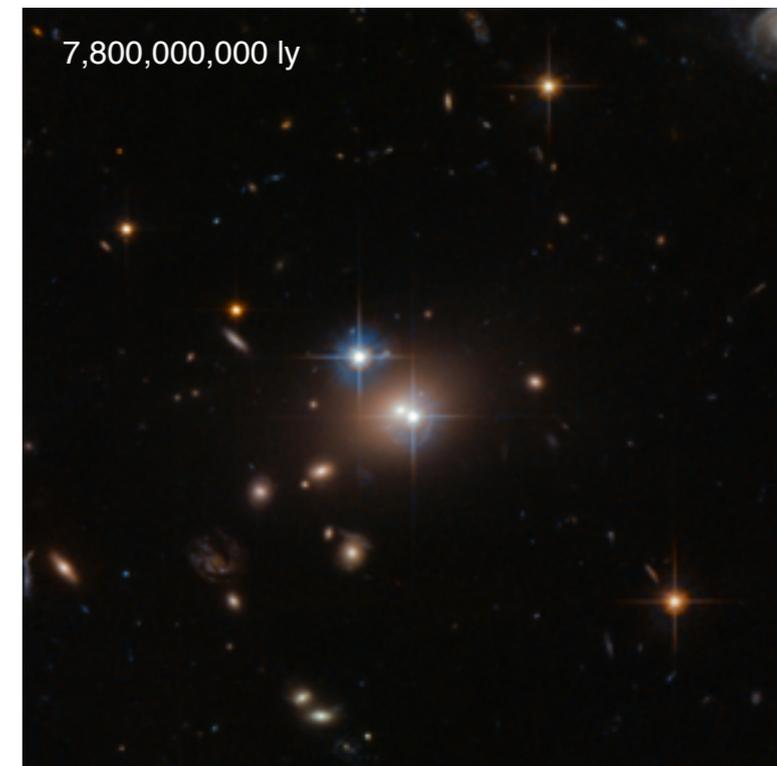
- La validità della previsione di Einstein sulla deflessione della luce è stata successivamente verificata da numerose osservazioni

- I risultati di Eddington sono stati successivamente aspramente criticati

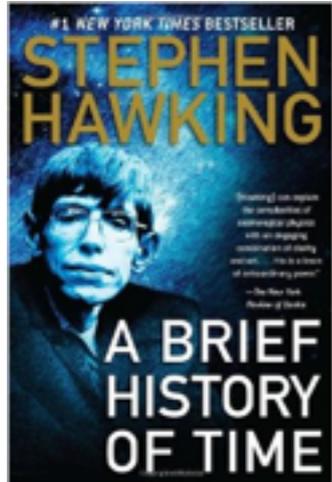


***"Their measurement had been sheer luck, or a case of knowing the result they wanted to get."***

- La validità della previsione di Einstein sulla deflessione della luce è stata successivamente verificata da numerose osservazioni
- 1979: Walsh, Carswell e Weymann scoprono due quasar (Q0957+561) *molto* simili...

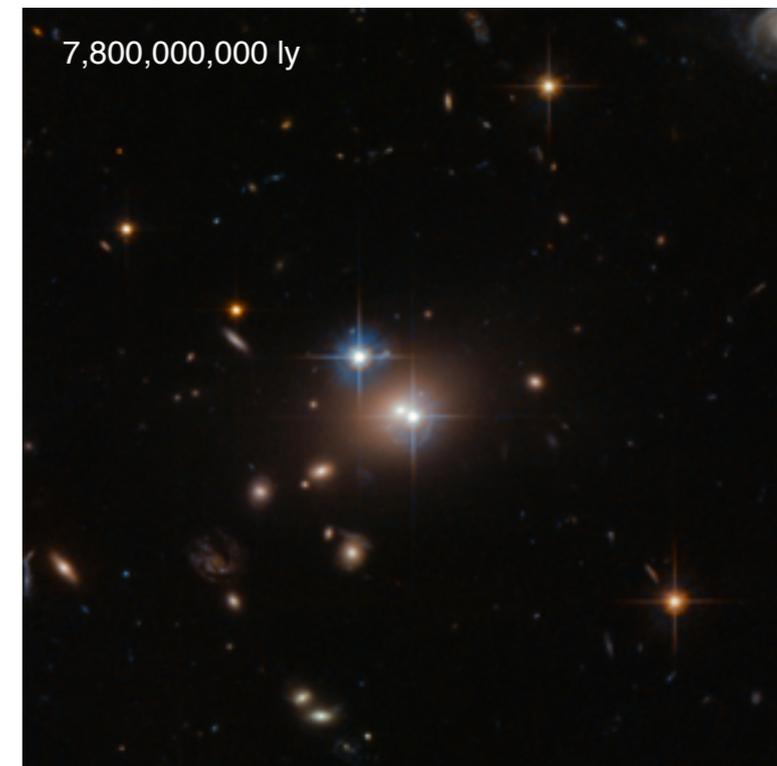


- I risultati di Eddington sono stati successivamente aspramente criticati



***"Their measurement had been sheer luck, or a case of knowing the result they wanted to get."***

- La validità della previsione di Einstein sulla deflessione della luce è stata successivamente verificata da numerose osservazioni
- 1979: Walsh, Carswell e Weymann scoprono due quasar (Q0957+561) *molto* simili...
- In realtà la quasar è una!
- La galassia YGKOW G1 agisce come una lente...



criticati

è stata

• I risultati

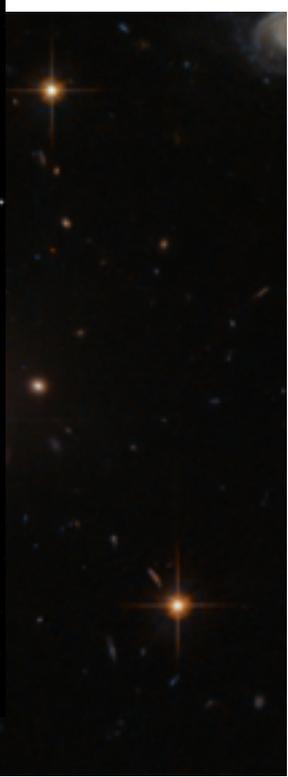
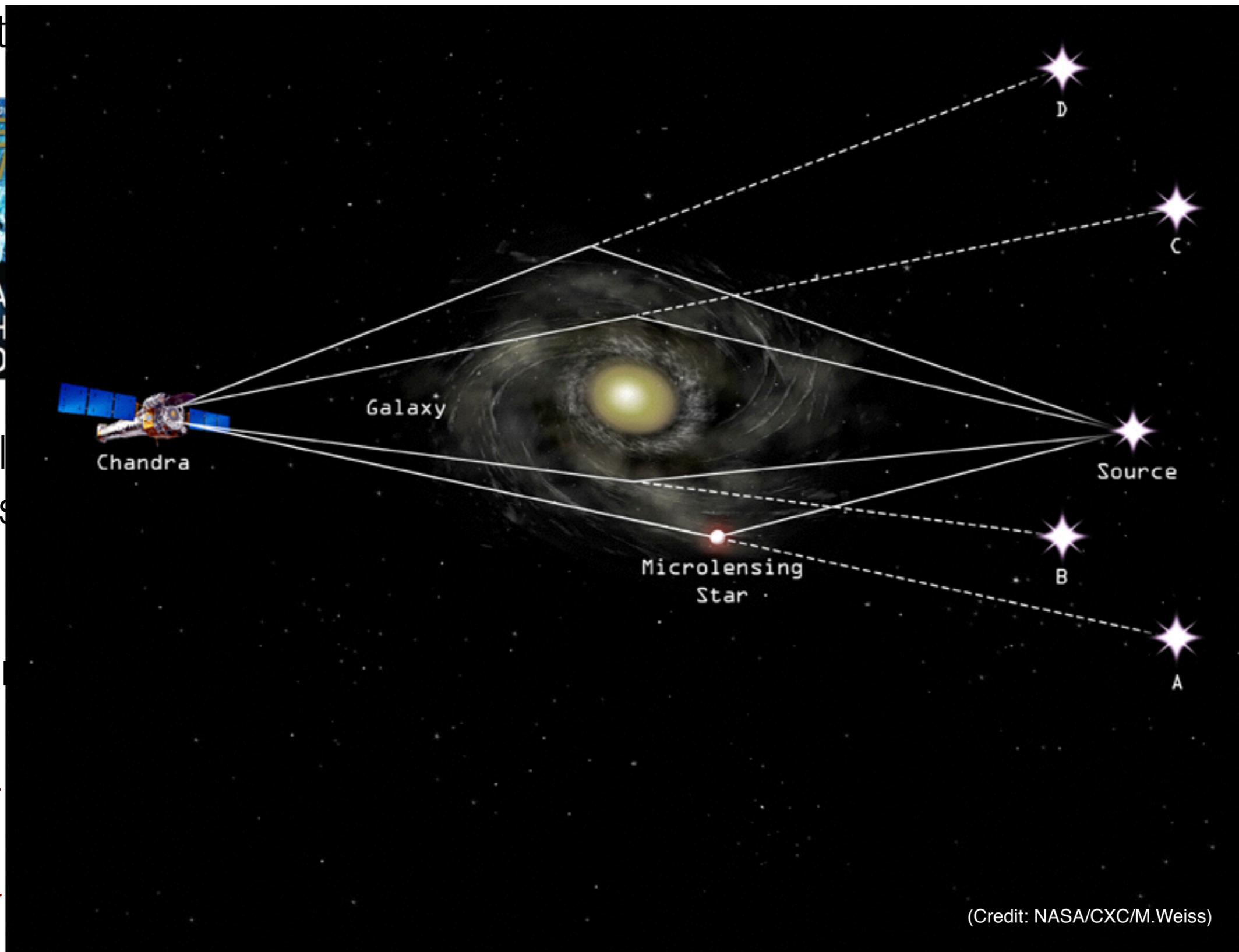


• La val  
succes

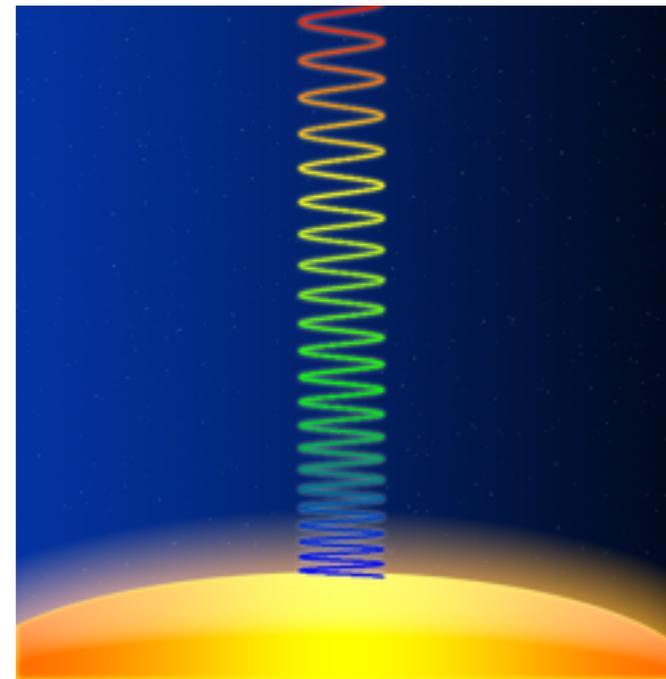
• 1979:  
quasar

• In rea

• La ga



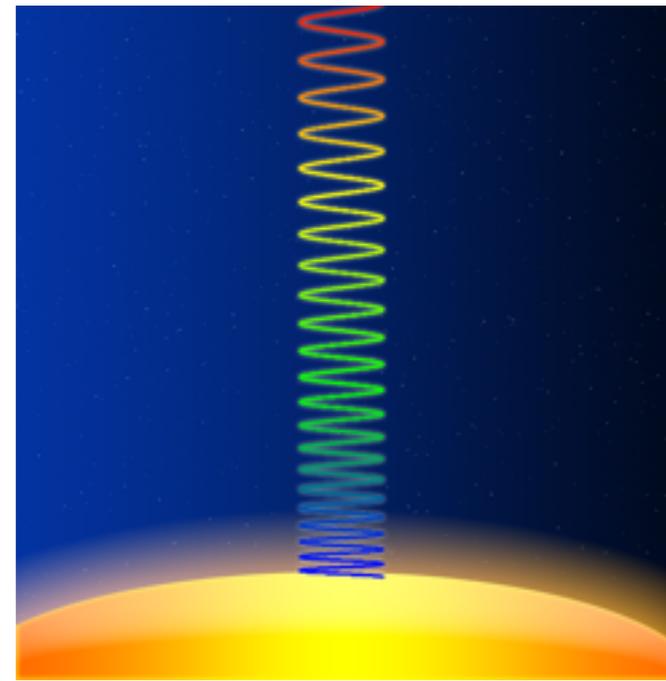
- Consideriamo la radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente in un campo gravitazionale



- Consideriamo la radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente in un campo gravitazionale

**RG:** La sua frequenza  $\nu$  sarà inferiore ( $\lambda$  maggiore) al diminuire del campo gravitazionale

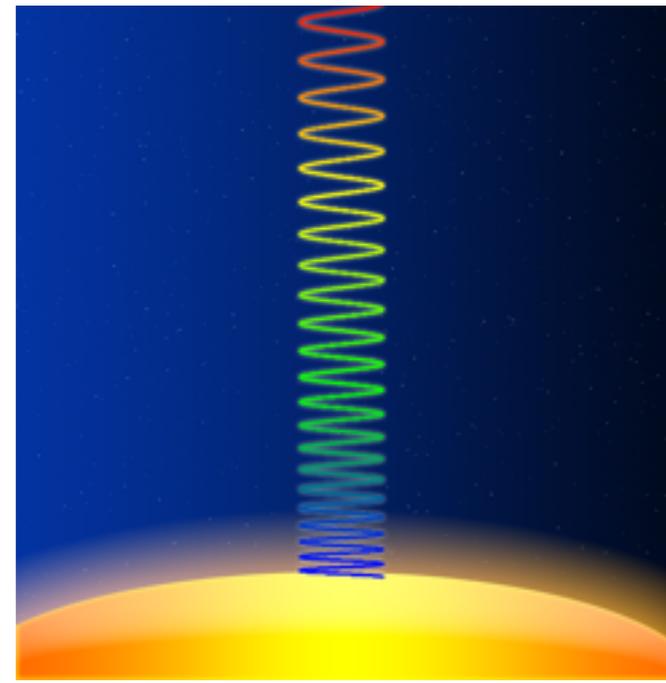
$$\frac{\nu}{\nu_0} \approx 1 - \frac{GM}{rc^2}$$



- Consideriamo la radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente in un campo gravitazionale

**RG:** La sua frequenza  $\nu$  sarà inferiore ( $\lambda$  maggiore) al diminuire del campo gravitazionale

$$\frac{\nu}{\nu_0} \approx 1 - \frac{GM}{rc^2}$$

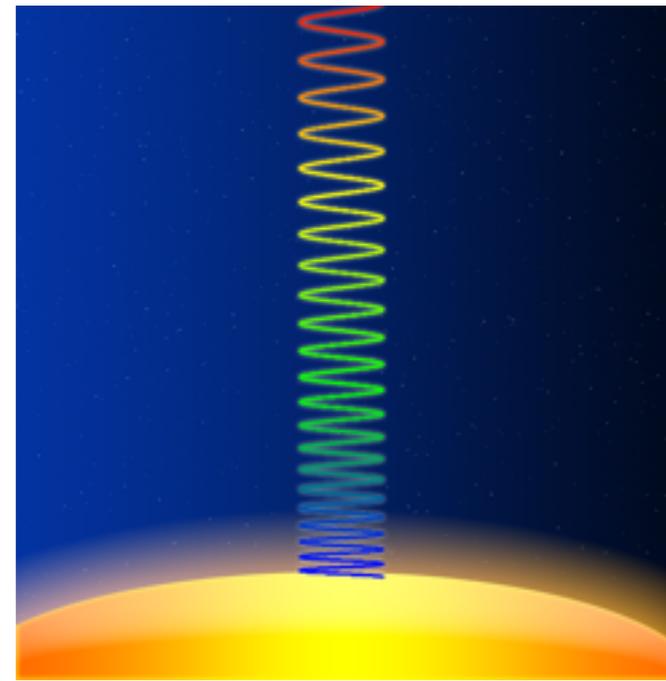


- Previsto da Einstein nel 1911 è stato verificato solo nel 1960 grazie alla scoperta di uno studente tedesco qualche anno prima...

- Consideriamo la radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente in un campo gravitazionale

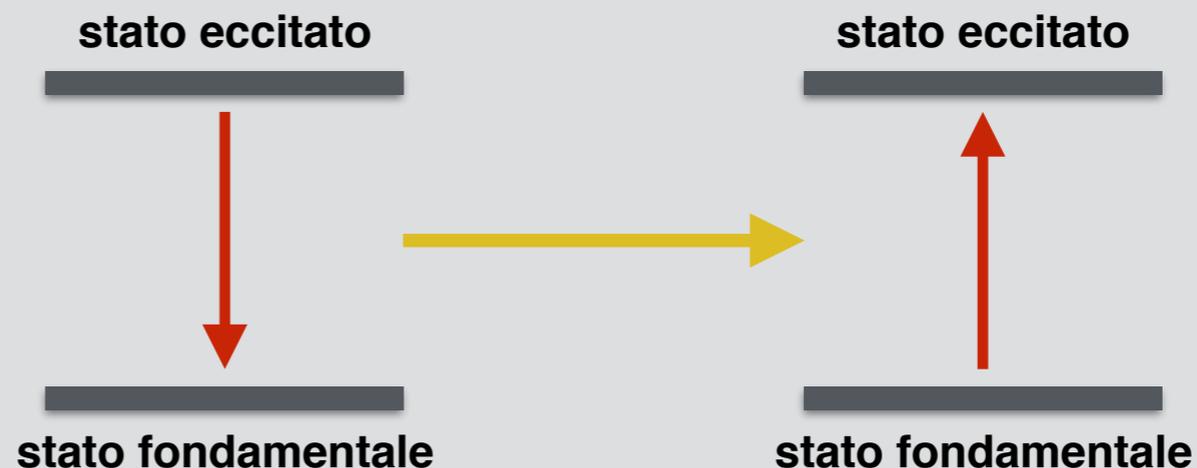
**RG:** La sua frequenza  $\nu$  sarà inferiore ( $\lambda$  maggiore) al diminuire del campo gravitazionale

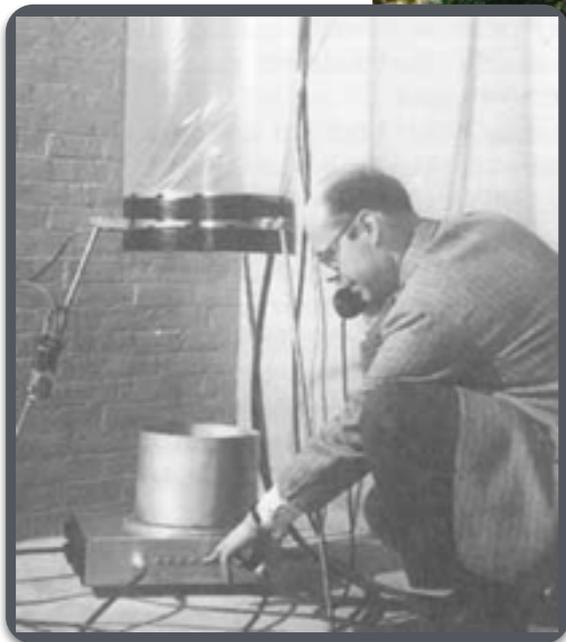
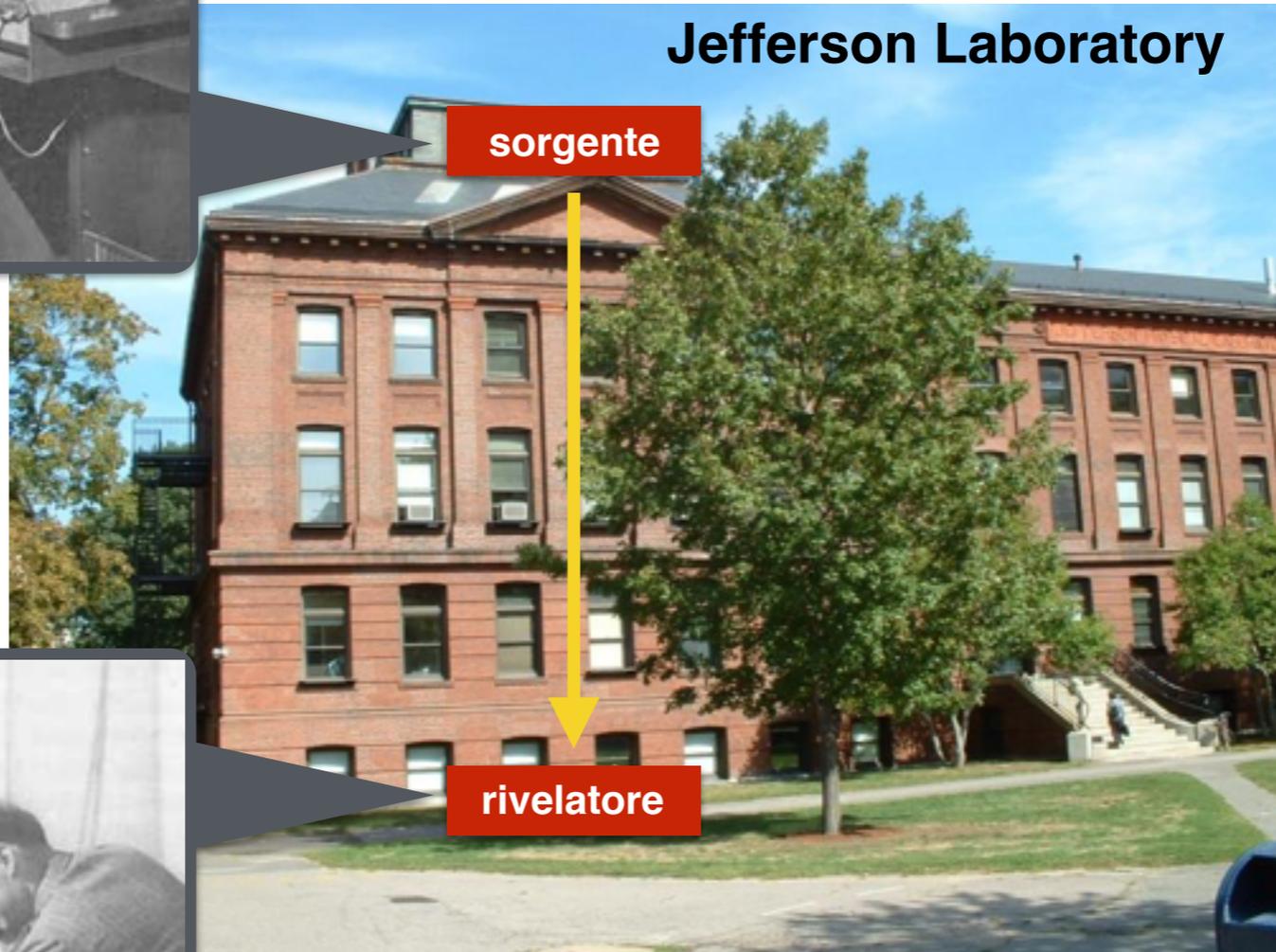
$$\frac{\nu}{\nu_0} \approx 1 - \frac{GM}{rc^2}$$



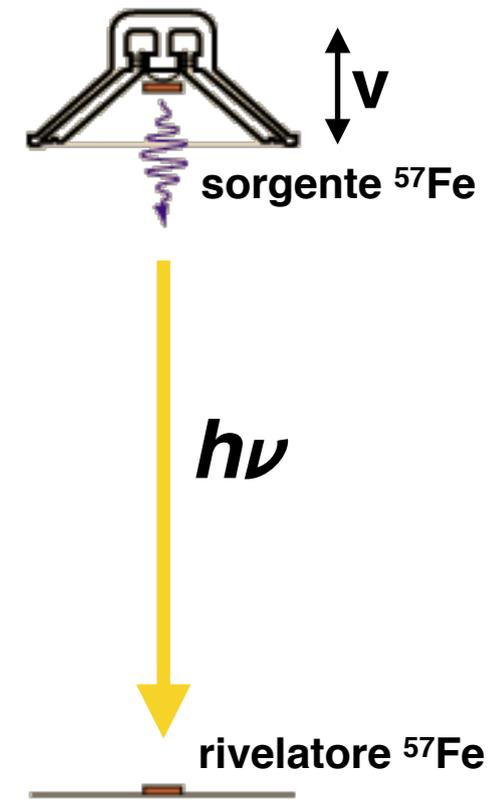
- Previsto da Einstein nel 1911 è stato verificato solo nel 1960 grazie alla scoperta di uno studente tedesco qualche anno prima...

## Effetto Mössbauer





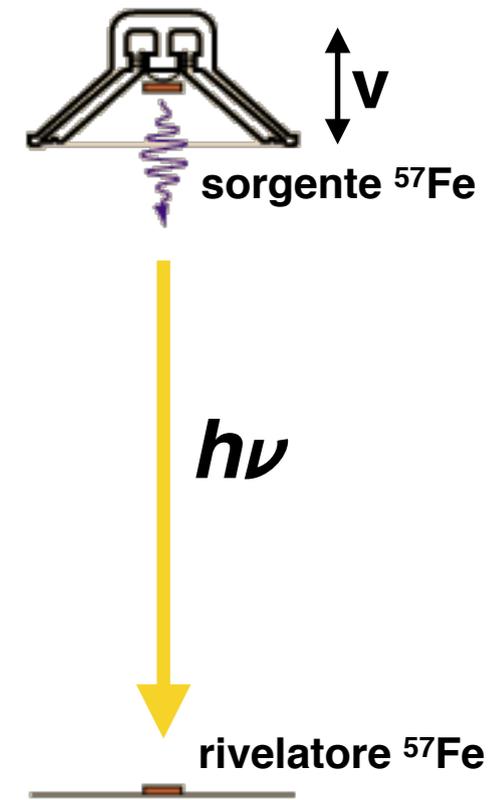
- È basato sull'emissione e assorbimento di raggi gamma per effetto Mössbauer
- La sorgente si muove con velocità  $\mathbf{v}$  rispetto al rivelatore



- È basato sull'emissione e assorbimento di raggi gamma per effetto Mössbauer
- La sorgente si muove con velocità  $\mathbf{v}$  rispetto al rivelatore
- Ci sono due processi fisici in gioco:

spostamento verso il rosso  
(redshift) gravitazionale

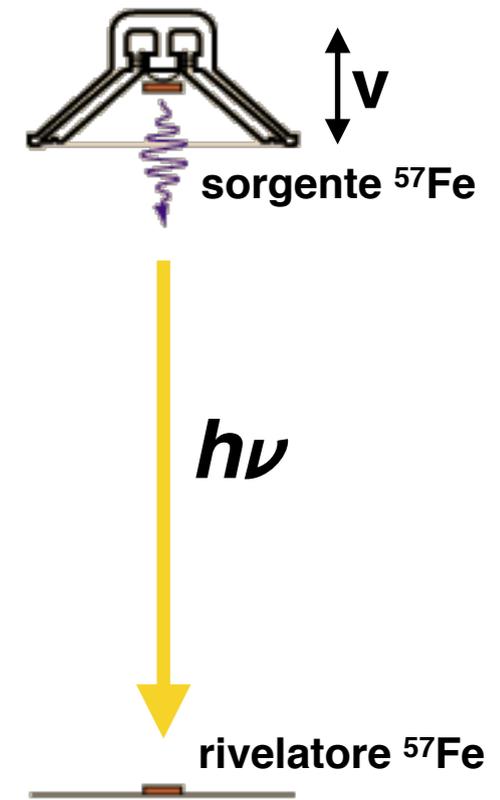
effetto Doppler



- È basato sull'emissione e assorbimento di raggi gamma per effetto Mössbauer
- La sorgente si muove con velocità  $\mathbf{v}$  rispetto al rivelatore
- Ci sono due processi fisici in gioco:

spostamento verso il rosso  
(redshift) gravitazionale

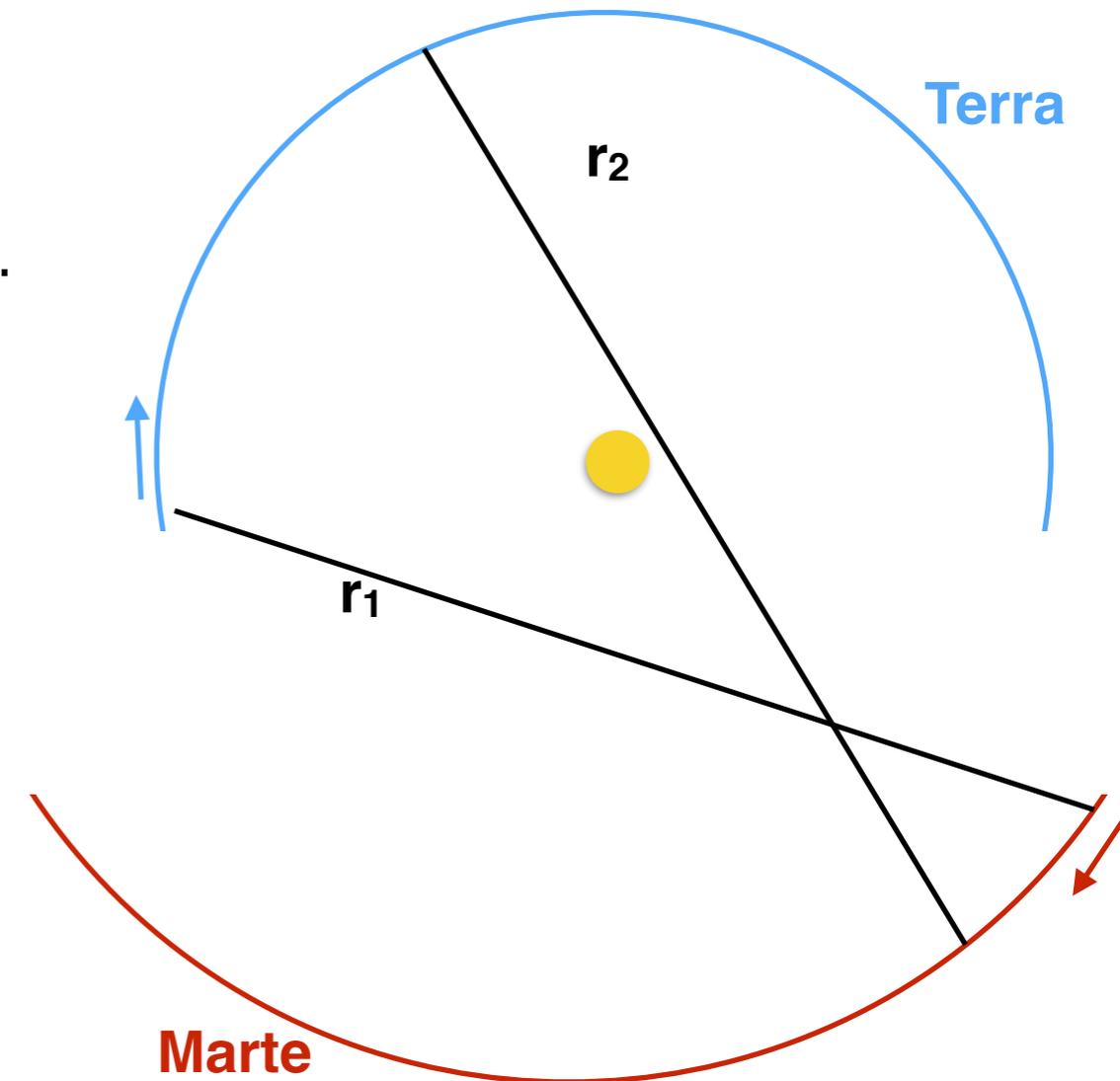
effetto Doppler



- Calibrando opportunamente il valore di  $\mathbf{v}$  l'effetto Doppler “compensa” l'effetto dello redshift
  - dalla misura di una velocità quantifichiamo il redshift gravitazionale...
  - l'accordo della misura con la predizione delle teoria entro il 10% (successivamente migliorato all'1% nel 1964)

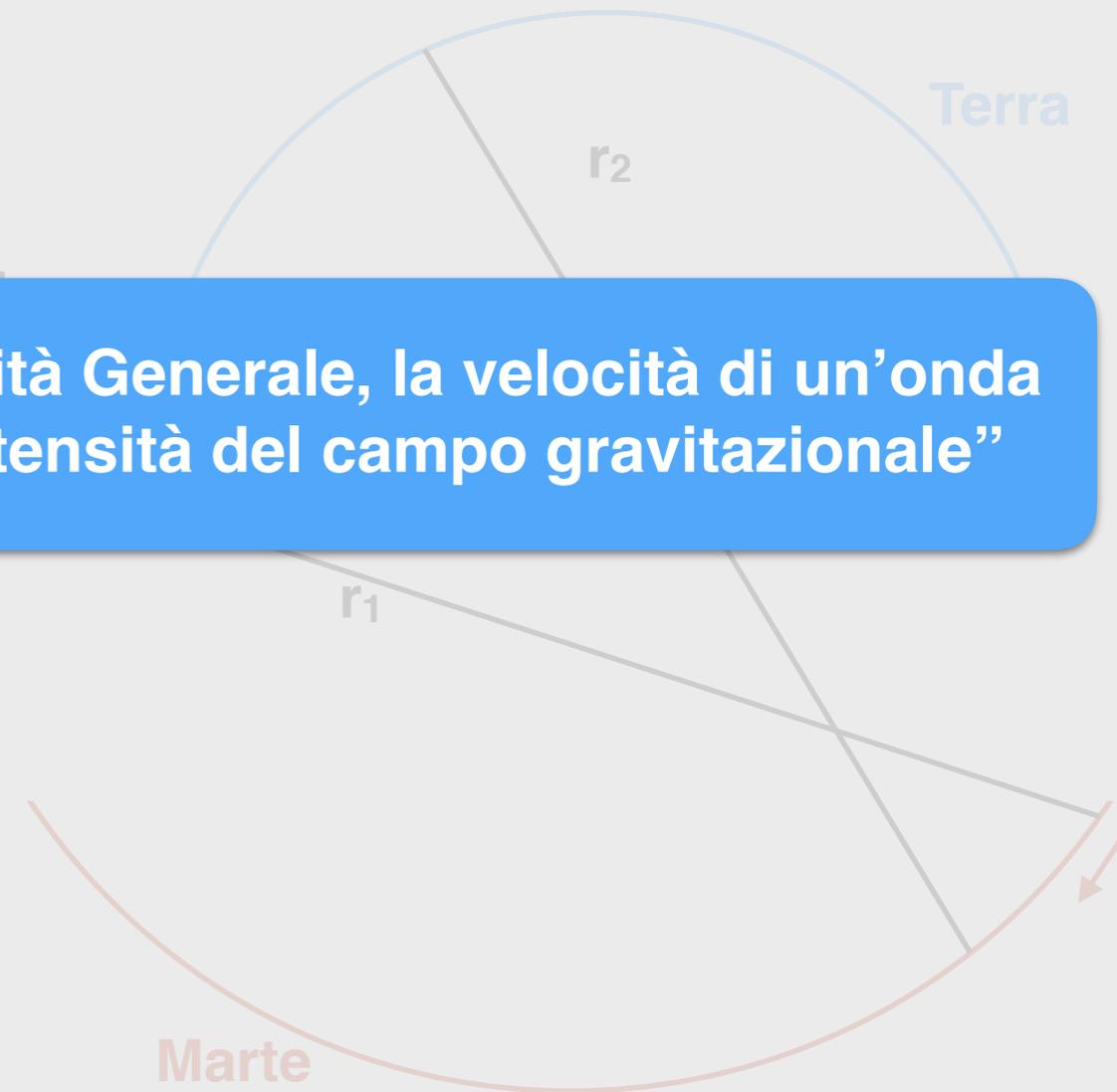
- Supponiamo di inviare un segnale radar verso Marte e misurare il tempo che impiega a tornare indietro sulla Terra

- Supponiamo di inviare un segnale radar verso Marte e misurare il tempo che impiega a tornare indietro sulla Terra
- Se il segnale passa in prossimità del Sole impiegherà un tempo più lungo a tornare...

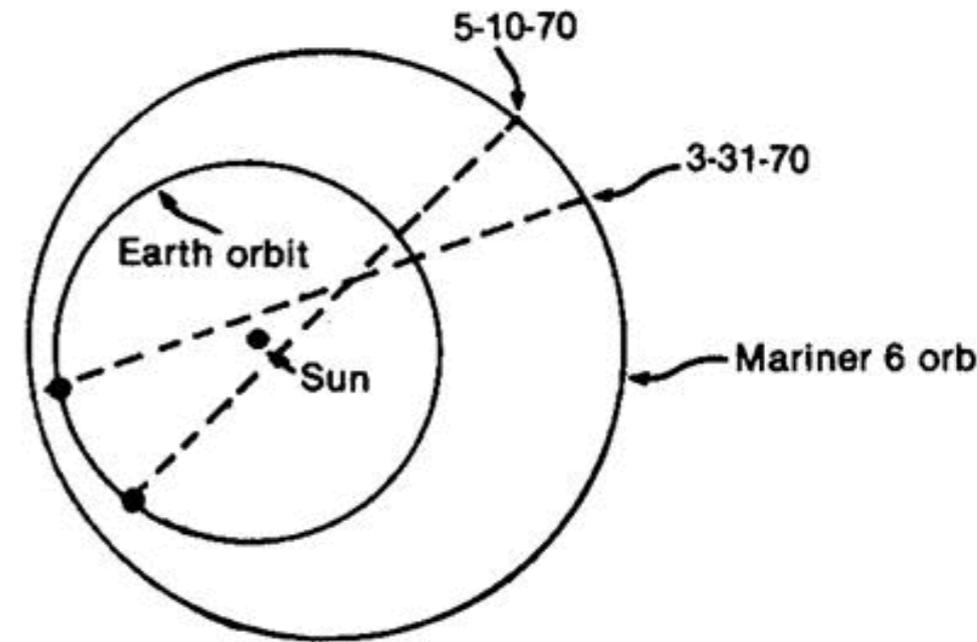


- Supponiamo di inviare un segnale radar verso Marte e misurare il tempo che impiega a tornare indietro sulla Terra
- Se il segnale passa in prossimità del Sole impiegherà un tempo più lungo a tornare...

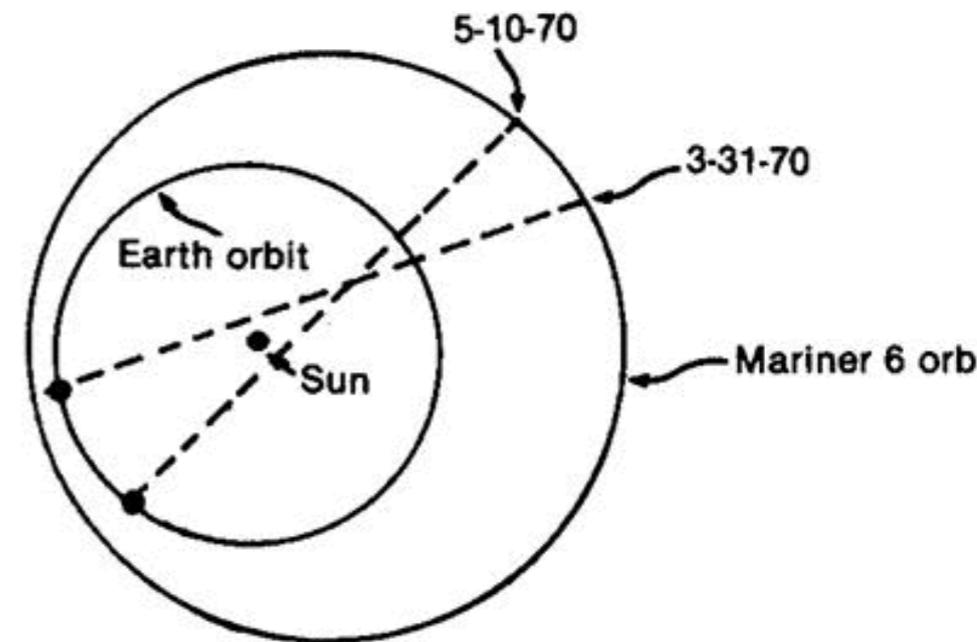
**Ritardo di Shapiro:** “in accordo con la Relatività Generale, la velocità di un’onda luminosa dipende dall’intensità del campo gravitazionale”



- Supponiamo di inviare un segnale radar verso Marte e misurare il tempo che impiega a tornare indietro sulla Terra
- Se il segnale passa in prossimità del Sole impiegherà un tempo più lungo a tornare...
- **1969**: la NASA lancia le sonde Mariner 6 e 7



- Supponiamo di inviare un segnale radar verso Marte e misurare il tempo che impiega a tornare indietro sulla Terra
- Se il segnale passa in prossimità del Sole impiegherà un tempo più lungo a tornare...

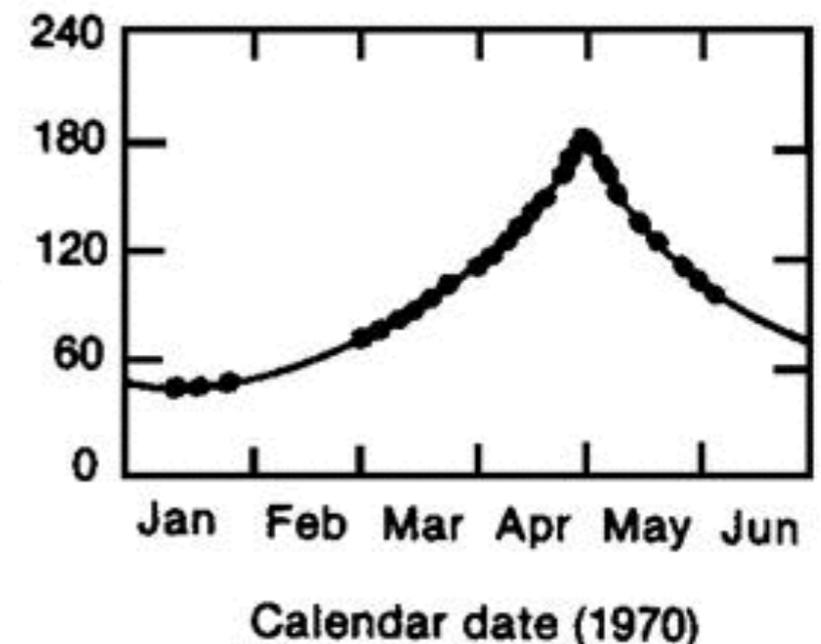


- **1969**: la NASA lancia le sonde Mariner 6 e 7

- Utilizzando il transponder delle due sonde si è potuto misurare il ritardo di Shapiro

- I risultati erano in accordo (entro il 5%) con quanto predetto dalla RG...grandi errori sperimentali però...

Total time delay  
(microseconds)

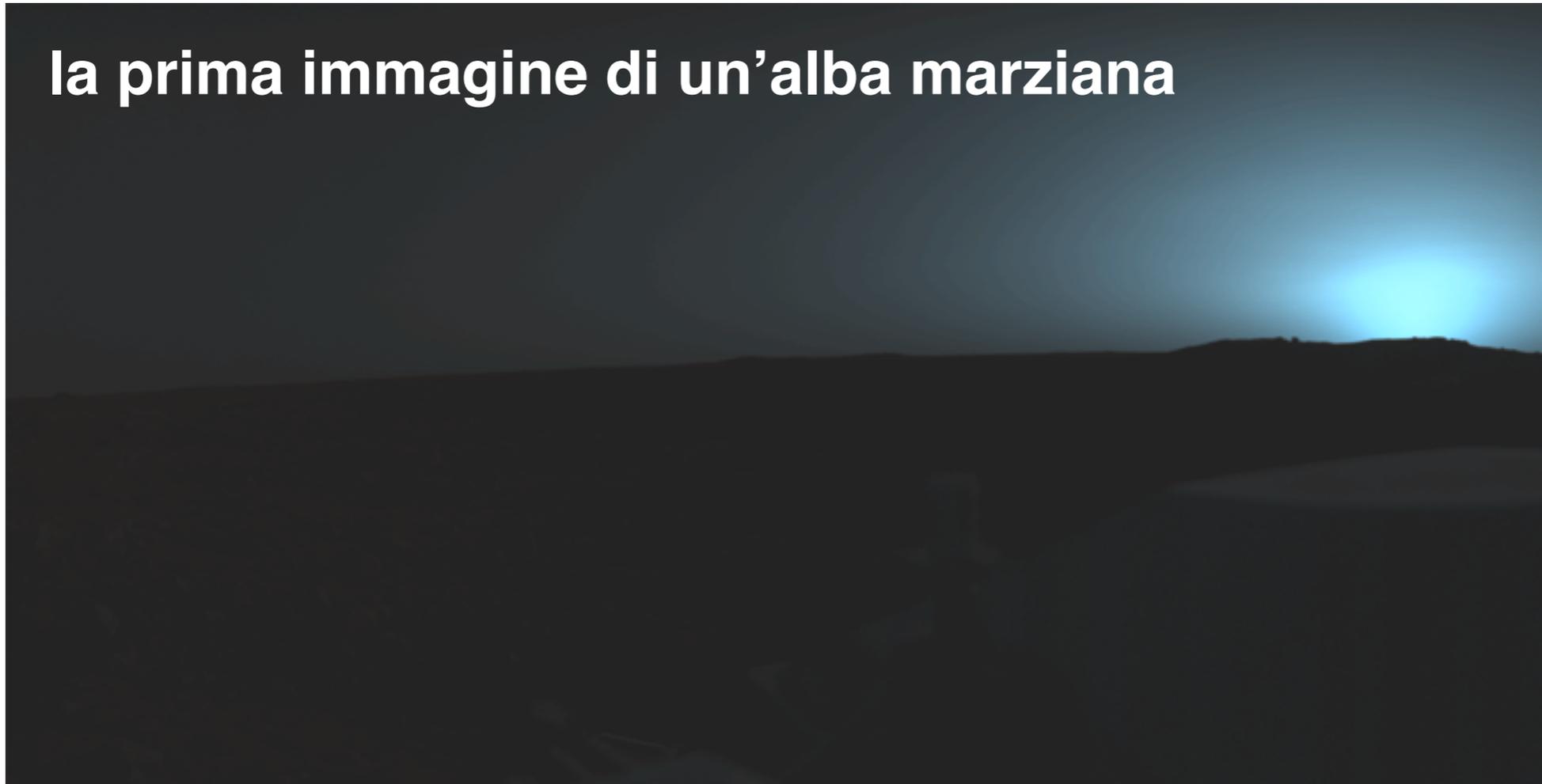


- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...

**la prima immagine di un'alba marziana**



- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...

## Il volto di Marte



- che ha dato nuovi “argomenti” ad ufologi, scrittori, sceneggiatori e registi...

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...

## Il volto di Marte



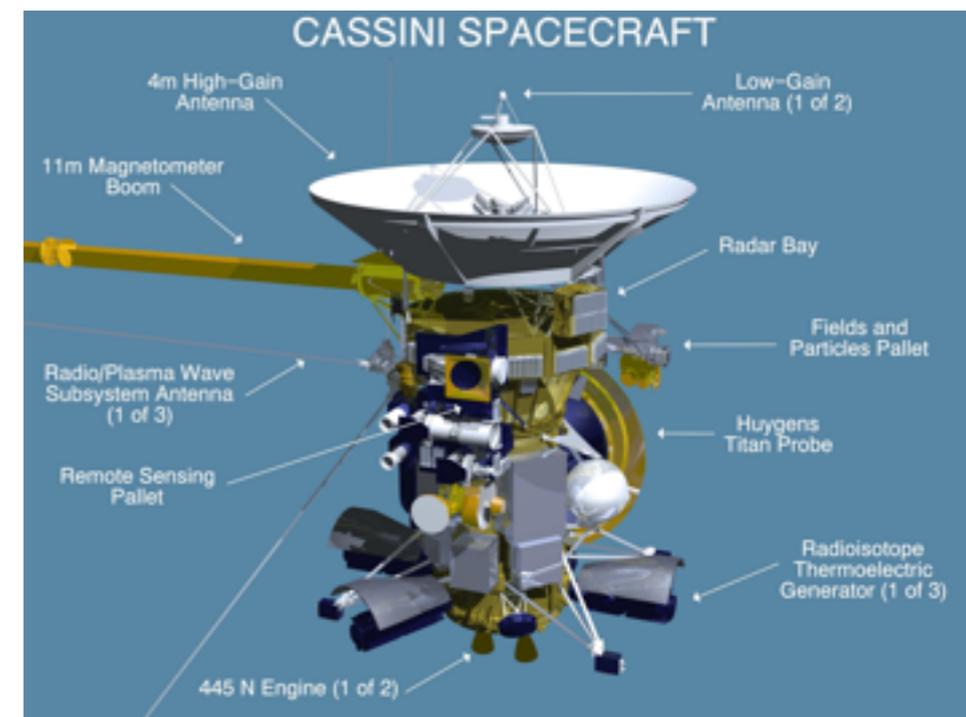
- che ha dato nuovi “argomenti” ad ufologi, scrittori, sceneggiatori e registi...
- ...peccato sia solo una formazione geologica naturale...

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...
- Non è forse molto noto che le missioni Viking abbiano lasciato un transponder sulla superficie di Marte

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...
- Non è forse molto noto che le missioni Viking abbiano lasciato un transponder sulla superficie di Marte
  - Elimina l'incertezza dovuta a variazioni delle orbite delle sonde

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...
- Non è forse molto noto che le missioni Viking abbiano lasciato un transponder sulla superficie di Marte
  - Elimina l'incertezza dovuta a variazioni delle orbite delle sonde
  - I risultati trovati erano in accordo con la teoria entro lo 0.5%

- La misura fu notevolmente migliorata grazie al programma Viking
- Diventato celebre grazie a due fotografie...
- Non è forse molto noto che le missioni Viking abbiano lasciato un transponder sulla superficie di Marte
  - Elimina l'incertezza dovuta a variazioni delle orbite delle sonde
  - I risultati trovati erano in accordo con la teoria entro lo 0.5%
- Nel 2003, usando la sonda Cassini in orbita attorno Saturno, si è raggiunta un'accuratezza dello 0.0012%!



# Le Onde Gravitazionali e la loro osservazione

- Nel 1916 Einstein si rese conto che la sua **equazione di campo** ammetteva soluzioni ondulatorie
  - Analogo al caso delle onde elettromagnetiche
  - Una forma di *radiazione gravitazionale*

- Nel 1916 Einstein si rese conto che la sua **equazione di campo** ammetteva soluzioni ondulatorie
  - Analogo al caso delle onde elettromagnetiche
  - Una forma di *radiazione gravitazionale*
- Fino agli anni '60 è stata vista come una «curiosità matematica»...

- Nel 1916 Einstein si rese conto che la sua **equazione di campo** ammetteva soluzioni ondulatorie
  - Analogo al caso delle onde elettromagnetiche
  - Una forma di *radiazione gravitazionale*
- Fino agli anni '60 è stata vista come una «curiosità matematica»...
  - Einstein stesso era scettico che una loro osservazione sperimentale fosse possibile

- Nel 1916 Einstein si rese conto che la sua **equazione di campo** ammetteva soluzioni ondulatorie
  - Analogo al caso delle onde elettromagnetiche
  - Una forma di *radiazione gravitazionale*
- Fino agli anni '60 è stata vista come una «curiosità matematica»...
  - Einstein stesso era scettico che una loro osservazione sperimentale fosse possibile
- Tuttavia a seguito di altre brillanti conferme della RG e alla scoperta delle Nove e Supernove inizia la caccia alle onde gravitazionali

- Le onde gravitazionali non sono state “scoperte” lo scorso Febbraio...

- Le onde gravitazionali non sono state “scoperte” lo scorso Febbraio...
- ...ma “solo” 35 anni prima...

## A NEW TEST OF GENERAL RELATIVITY: GRAVITATIONAL RADIATION AND THE BINARY PULSAR PSR 1913+16

J. H. TAYLOR AND J. M. WEISBERG

Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, Amherst; and Joseph Henry Laboratories, Physics Department, Princeton University

Received 1981 July 2; accepted 1981 August 28

### ABSTRACT

Observations of pulse arrival times from the binary pulsar PSR 1913+16 between 1974 September and 1981 March are now sufficient to yield a solution for the component masses and the absolute size of the orbit. We find the total mass to be almost equally distributed between the pulsar and its unseen companion, with  $m_p = 1.42 \pm 0.06 M_\odot$  and  $m_c = 1.41 \pm 0.06 M_\odot$ . These values are used, together with the well determined orbital period and eccentricity, to calculate the rate at which the orbital period should decay as energy is lost from the system via gravitational radiation. According to the general relativistic quadrupole formula, one should expect for the PSR 1913+16 system an orbital period derivative  $\dot{P}_b = (-2.403 \pm 0.005) \times 10^{-12}$ . Our observations yield the measured value  $\dot{P}_b = (-2.30 \pm 0.22) \times 10^{-12}$ . The excellent agreement provides compelling evidence for the existence of gravitational radiation, as well as a new and profound confirmation of the general theory of relativity.

*Subject headings:* gravitation — pulsars — relativity

- Le onde gravitazionali non sono state “scoperte” lo scorso Febbraio...
- ...ma “solo” 35 anni prima...

A NEW TEST OF GENERAL RELATIVITY: GRAVITATIONAL RADIATION AND  
THE BINARY PULSAR PSR 1913+16

J. H. TAYLOR AND J. M. WEISBERG

Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, Amherst; and Joseph Henry Laboratories,  
Physics Department, Princeton University

Received 1981 July 2; accepted 1981 August 28

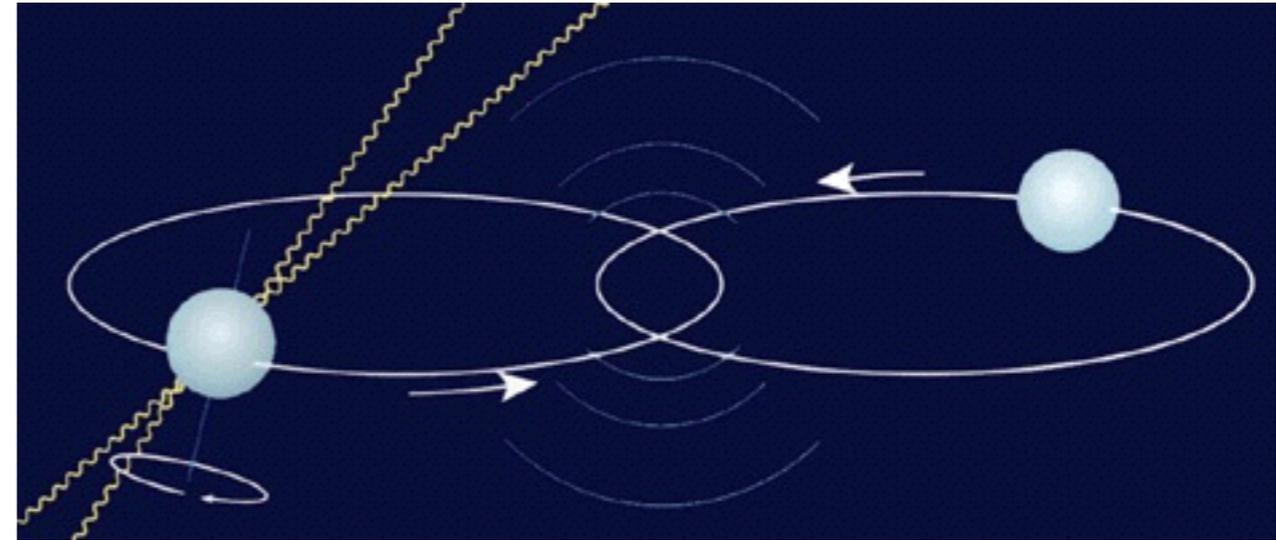
ABSTRACT

Observations of pulse arrival times from the binary pulsar PSR 1913+16 between 1974 September and 1981 March are now sufficient to yield a solution for the component masses and the absolute size of the orbit. We find the total mass to be almost equally distributed between the pulsar and its unseen companion, with  $m_p = 1.42 \pm 0.06 M_\odot$  and  $m_c = 1.41 \pm 0.06 M_\odot$ . These values are used, together with the well determined orbital period and eccentricity, to calculate the rate at which the orbital period should decay as energy is lost from the system via gravitational radiation. According to the general relativistic quadrupole formula, one should expect for the PSR 1913+16 system an orbital period derivative  $\dot{P}_b = (-2.403 \pm 0.005) \times 10^{-12}$ . Our observations yield the measured value  $\dot{P}_b = (-2.30 \pm 0.22) \times 10^{-12}$ . The excellent agreement provides compelling evidence for the existence of gravitational radiation, as well as a new and profound confirmation of the general theory of relativity.

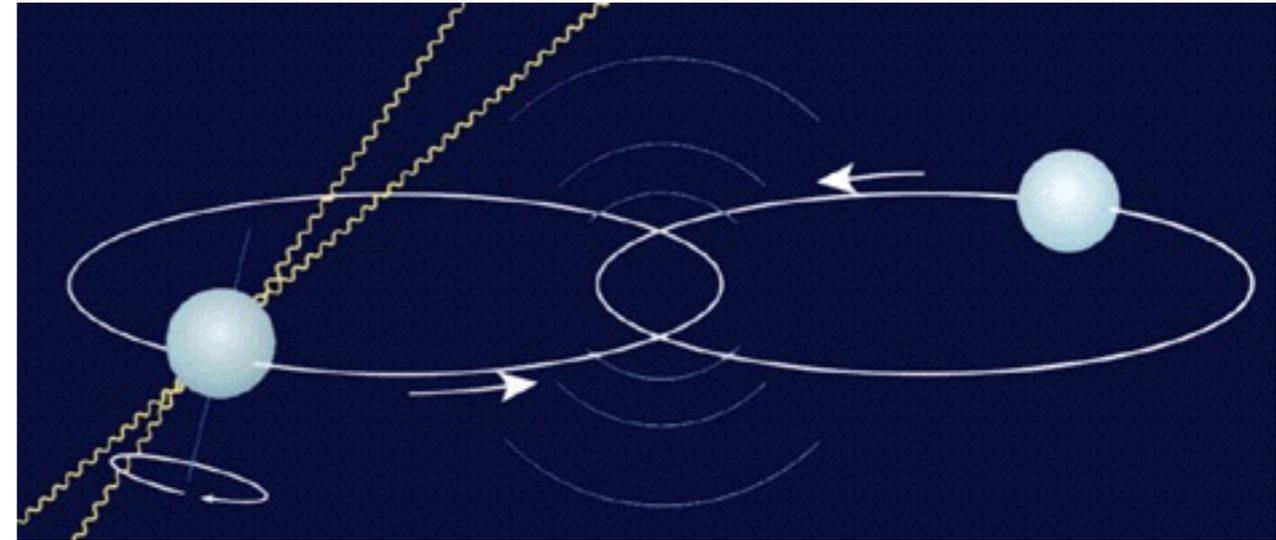
*Subject headings:* gravitation — pulsars — relativity

- Nel 1973 Hulse and Taylor osservano una pulsar con periodo di 59 ms
  - Anomalia nell'emissione della radiazione della pulsar
  - Hanno scoperto il primo sistema binario di una pulsar

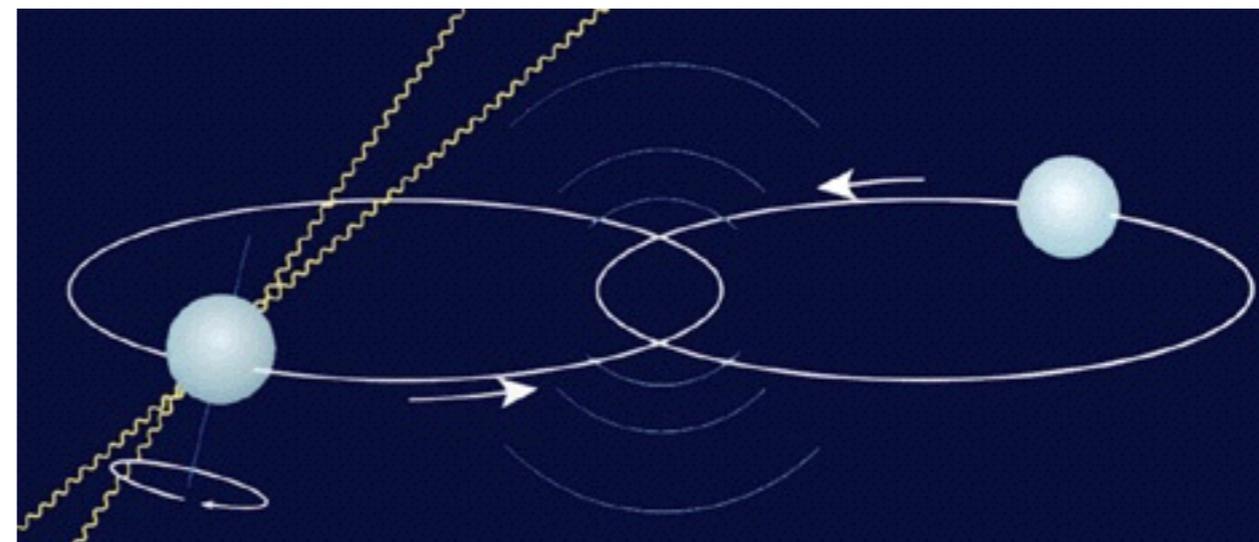
- In realtà hanno scoperto un “mostro”
  - Masse  $\sim 1.4$  masse solari
  - $v \sim 100 - 300 \text{ km/s}$  e  $T \sim 8 \text{ h}$



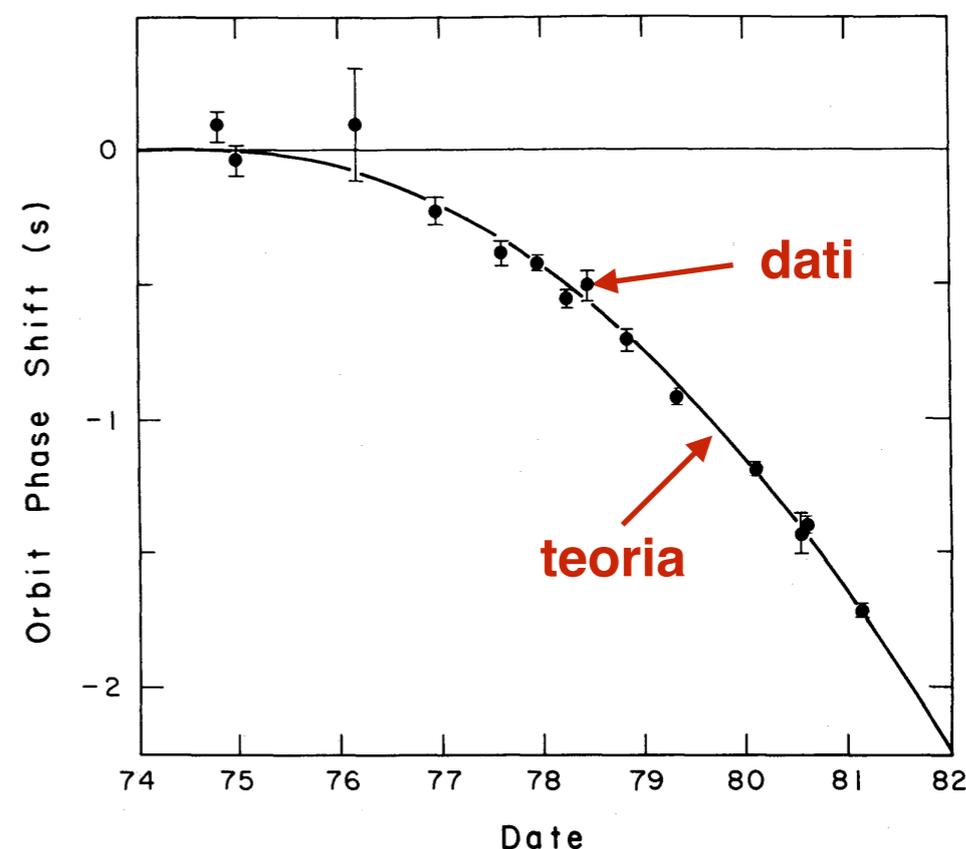
- In realtà hanno scoperto un “mostro”
  - Masse  $\sim 1.4$  masse solari
  - $v \sim 100 - 300 \text{ km/s}$  e  $T \sim 8 \text{ h}$
- La RG prevede che un sistema binario di stelle emette energia sotto forma di onde gravitazionali



- In realtà hanno scoperto un “mostro”
  - Masse  $\sim 1.4$  masse solari
  - $v \sim 100 - 300 \text{ km/s}$  e  $T \sim 8 \text{ h}$
- La RG prevede che un sistema binario di stelle emette energia sotto forma di onde gravitazionali



**Dati sperimentali in eccellente  
accordo con le previsioni della RG**

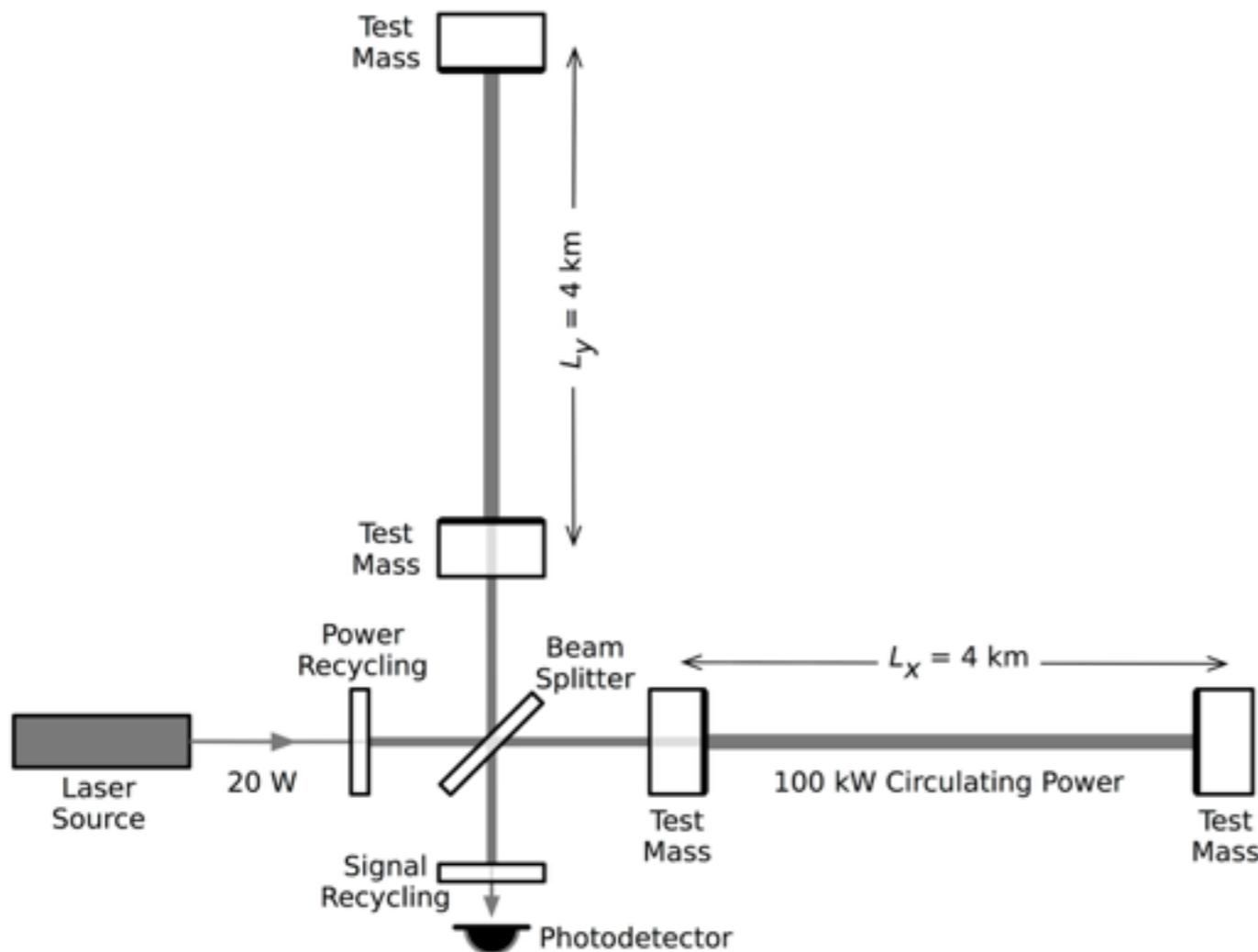




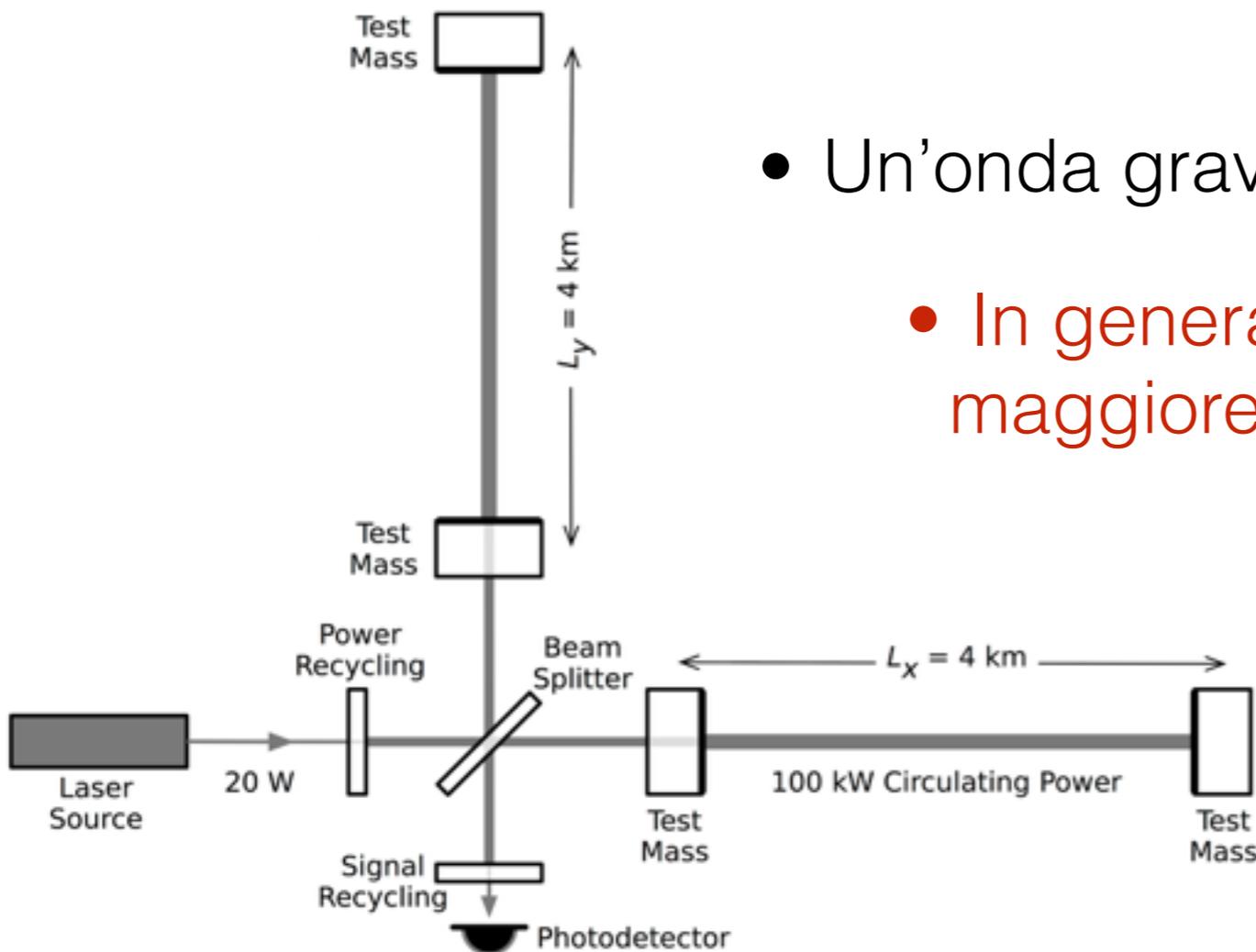
- Supponiamo di avere 2 oggetti a 4 km di distanza...

- Supponiamo di avere 2 oggetti a 4 km di distanza...  
...e di voler misurare variazioni della loro distanza inferiori a  **$10^{-18}$  m**

- Supponiamo di avere 2 oggetti a 4 km di distanza...  
...e di voler misurare variazioni della loro distanza inferiori a  **$10^{-18}$  m**

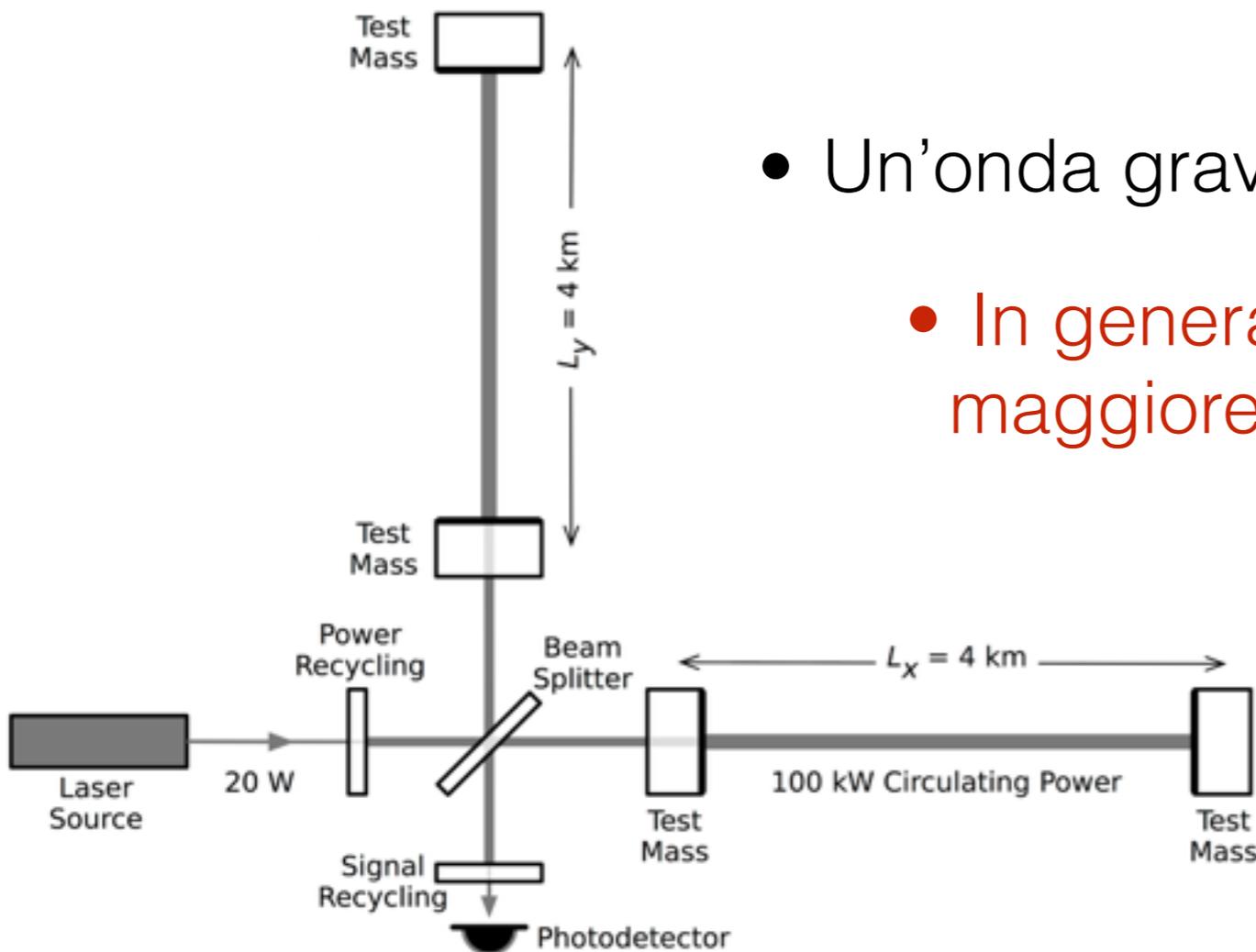


- Supponiamo di avere 2 oggetti a 4 km di distanza...  
...e di voler misurare variazioni della loro distanza inferiori a  **$10^{-18}$  m**



- Un'onda gravitazionale è polarizzata linearmente
  - In generale produrrà una deformazione maggiore di uno dei due bracci

- Supponiamo di avere 2 oggetti a 4 km di distanza...  
...e di voler misurare variazioni della loro distanza inferiori a  **$10^{-18}$  m**

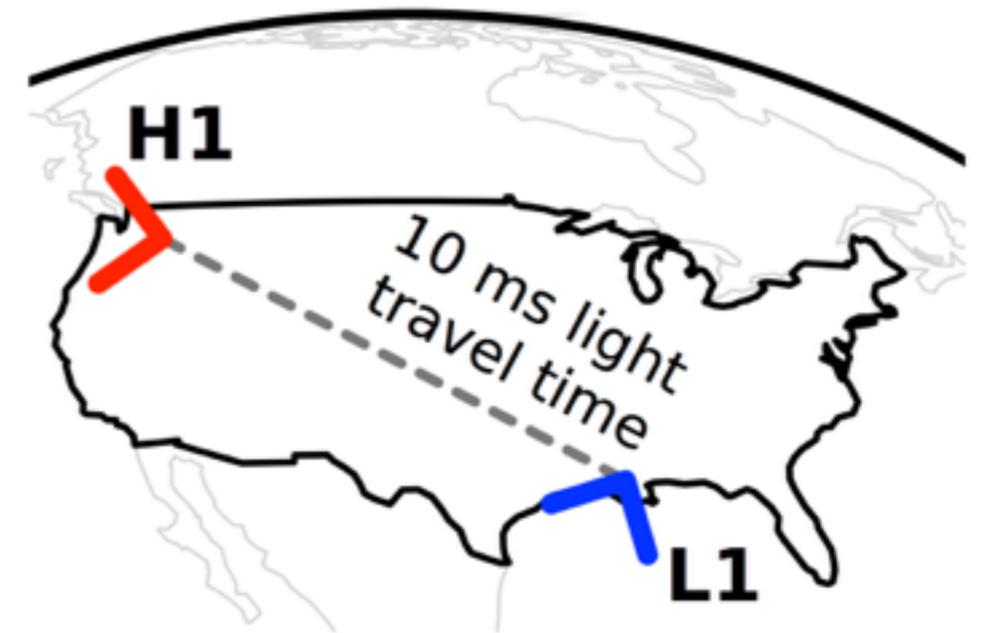


- Un'onda gravitazionale è polarizzata linearmente
  - In generale produrrà una deformazione maggiore di uno dei due bracci

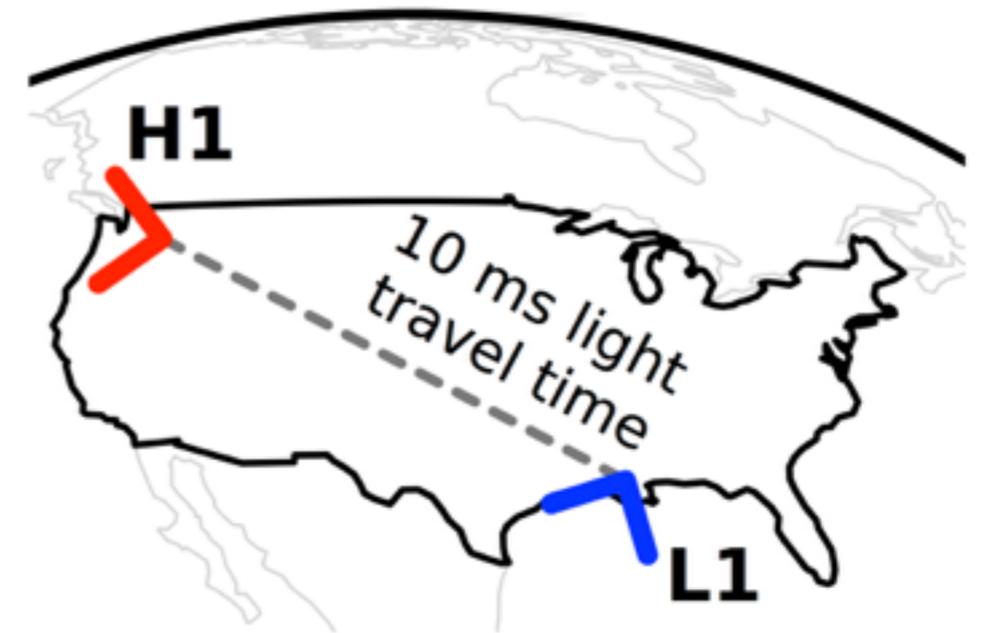


- Due rivelatori per il controllo incrociato dei risultati

- 14 Settembre 2015: alle ore 10:50.45 (ora italiana) entrambi gli interferometri LIGO osservano un *segnale*

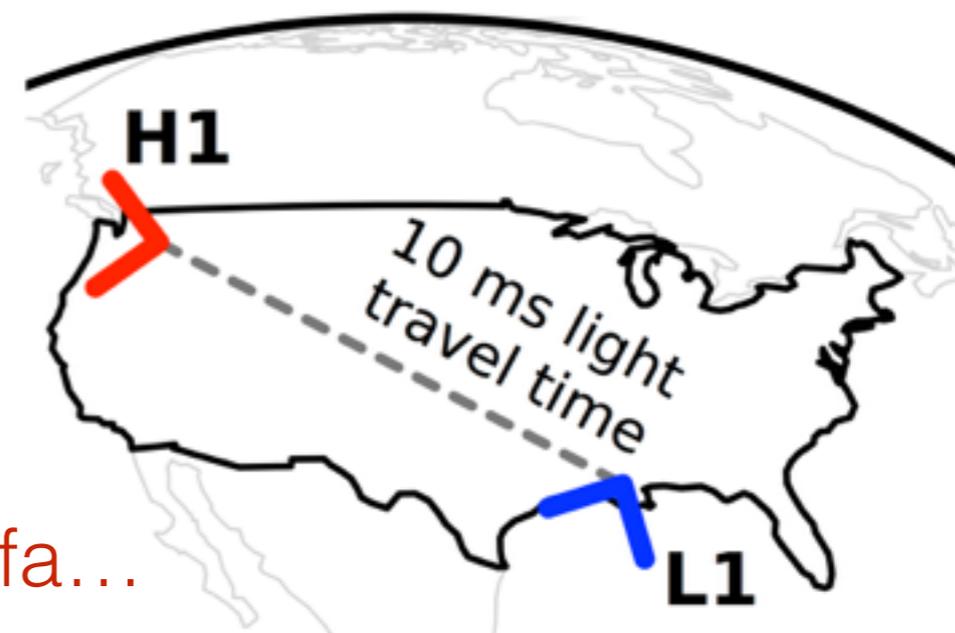


- 14 Settembre 2015: alle ore 10:50.45 (ora italiana) entrambi gli interferometri LIGO osservano un *segnale*
- Segnale è stato prodotto dal processo di fusione di due buchi neri



- 14 Settembre 2015: alle ore 10:50.45 (ora italiana) entrambi gli interferometri LIGO osservano un *segnale*

- Segnale è stato prodotto dal processo di fusione di due buchi neri



- processo avvenuto 1.5 miliardi di anni fa...

- $29 + 36 \stackrel{?}{=} 62$  masse solari

- 3 masse solari corrispondono all'energia emessa sotto forma di onde gravitazionali

- 14 Settembre 2015: alle ore 10:50.45 (ora italiana) entrambi gli interferometri LIGO osservano un *segnale*

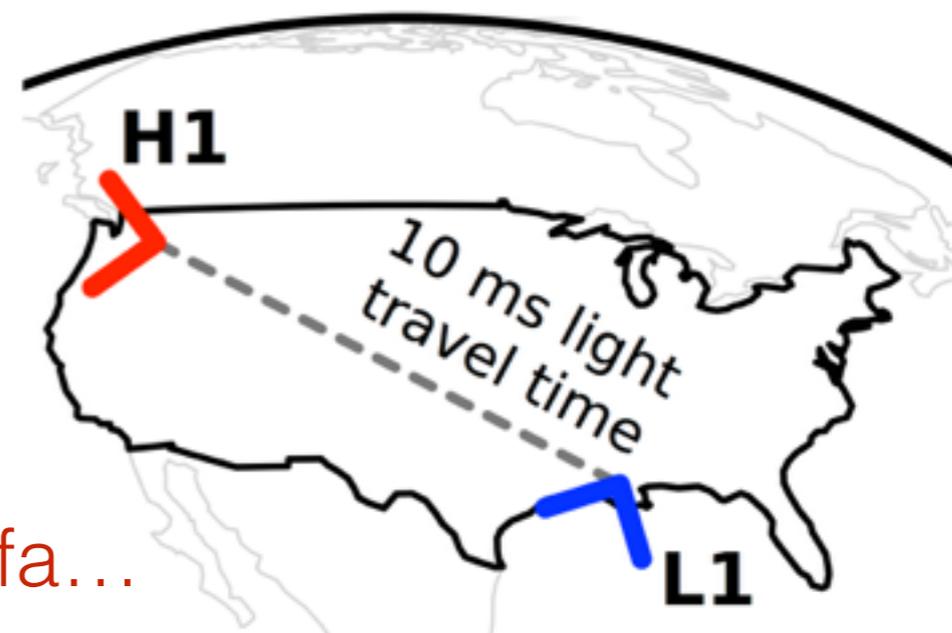
- Segnale è stato prodotto dal processo di fusione di due buchi neri

- processo avvenuto 1.5 miliardi di anni fa...

- $29 + 36 \stackrel{?}{=} 62$  masse solari

- 3 masse solari corrispondono all'energia emessa sotto forma di onde gravitazionali

- L'osservazione conferma anche l'esistenza di sistemi binari di *buchi neri di massa stellare* ( $M > 25 M_{\odot}$ )



# Test sulla validità del Principio di Equivalenza

- **Principio di equivalenza debole (WEP)**: l'accelerazione di caduta di un corpo per effetto della gravità non dipende dalla sua massa

- La **massa inerziale** *misura* la proprietà di un corpo di opporsi alle variazioni del suo stato di moto

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

- La **massa gravitazionale** è quella che compare nella legge di gravitazione di Newton e *misura* la forza attrattiva tra due corpi

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

- Se l'accelerazione di caduta è indipendente massa, allora **necessariamente** la massa inerziale è uguale a quella gravitazionale

- Einstein estese il WEP, creandone una versione più *forte*
- Il Principio di Equivalenza di Einstein (**EEP**) richiede la validità del:

- principio di equivalenza *debole* (**WEP**)

- l'invarianza locale di Lorentz (**LLI**)

- Il risultato di un esperimento (che non coinvolga l'interazione gravitazionale) non dipende dalla velocità del sistema di riferimento in cui è eseguito

- l'invarianza locale di posizione (**LPI**)

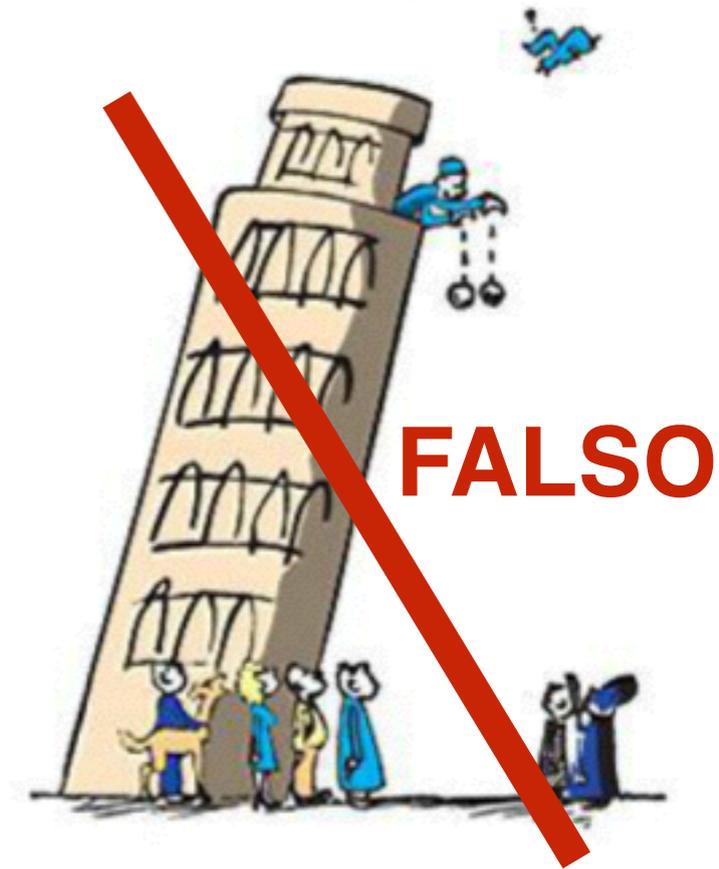
- Il risultato di un esperimento (che non coinvolga l'interazione gravitazionale) non dipende dal quando o dal dove nell'Universo è eseguito

- I primi test sulla validità del principio di equivalenza furono compiuti da Galileo Galilei nel XVI secolo

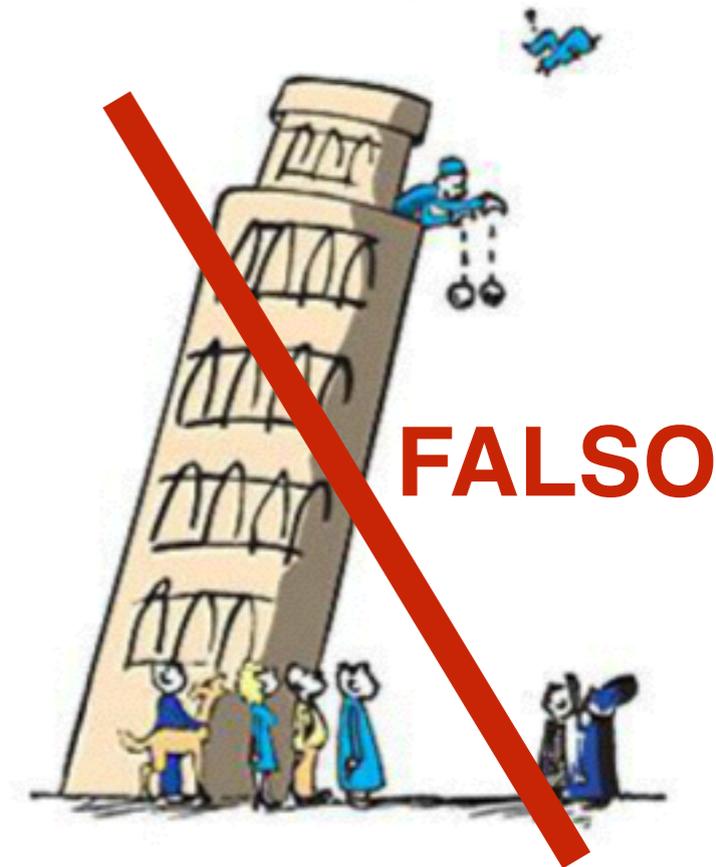
- I primi test sulla validità del principio di equivalenza furono compiuti da Galileo Galilei nel XVI secolo
- La leggenda vuole che Galileo “scoprì” il principio di equivalenze lanciando oggetti dalla Torre di Pisa



- I primi test sulla validità del principio di equivalenza furono compiuti da Galileo Galilei nel XVI secolo
- La leggenda vuole che Galileo “scoprì” il principio di equivalenze lanciando oggetti dalla Torre di Pisa



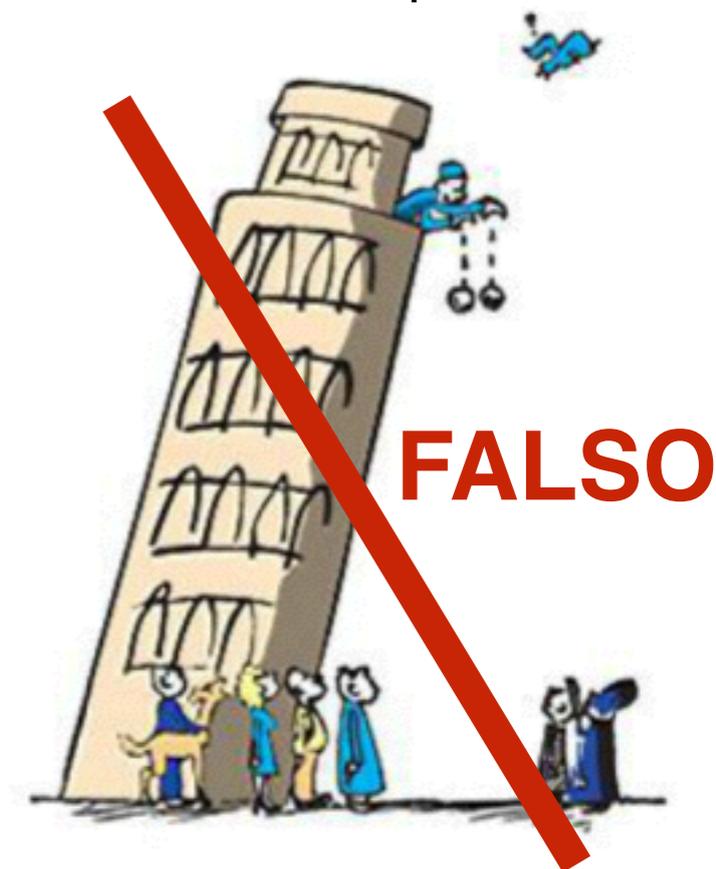
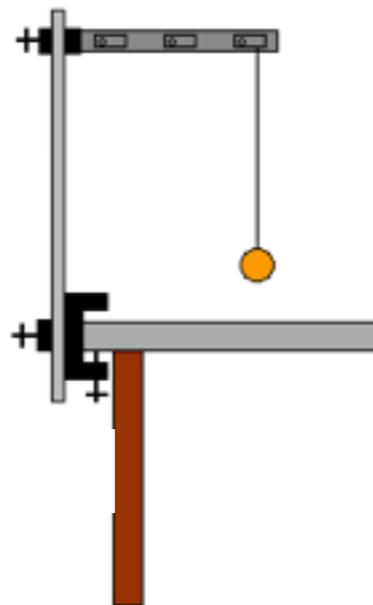
- I primi test sulla validità del principio di equivalenza furono compiuti da Galileo Galilei nel XVI secolo
- La leggenda vuole che Galileo “scoprì” il principio di equivalenze lanciando oggetti dalla Torre di Pisa
- Come ha fatto allora?



- I primi test sulla validità del principio di equivalenza furono compiuti da Galileo Galilei nel XVI secolo
- La leggenda vuole che Galileo “scoprì” il principio di equivalenze lanciando oggetti dalla Torre di Pisa
- Come ha fatto allora?

**con un pendolo!**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \cdot \frac{m_i}{m_g}}$$

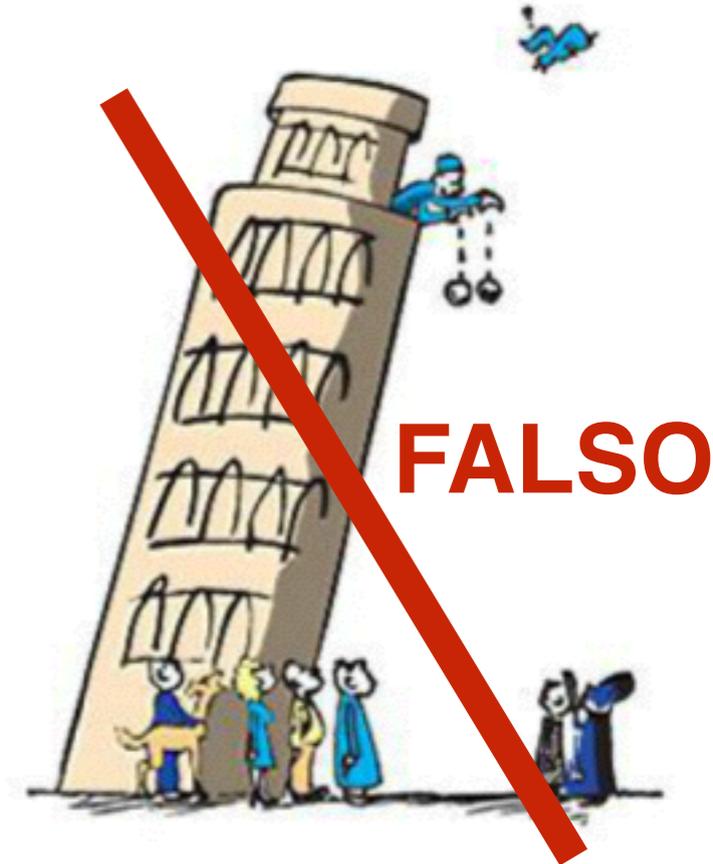
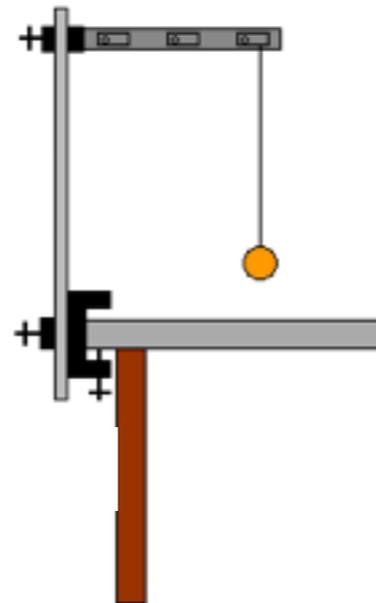


**precisione 0.1%?**

- I primi test sulla validità del principio di equivalenza furono compiuti da Galileo Galilei nel XVI secolo
- La leggenda vuole che Galileo “scoprì” il principio di equivalenze lanciando oggetti dalla Torre di Pisa
- Come ha fatto allora?

**con un pendolo!**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \cdot \frac{m_i}{m_g}}$$



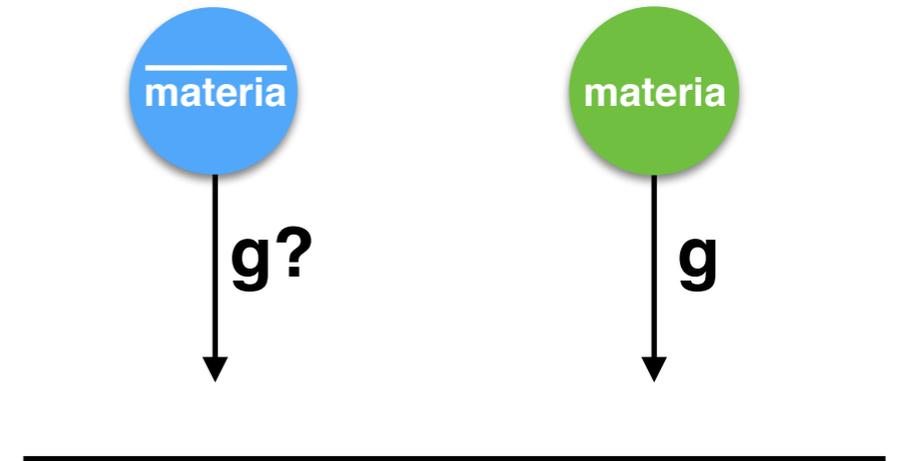
**precisione 0.1%?**

- All'inizio del 1900 **Eötvös** con un bilancia di torsione ha raggiunto una precisione di...**0.0000001%**

- Il principio di equivalenza (debole) vale anche per l'antimateria?

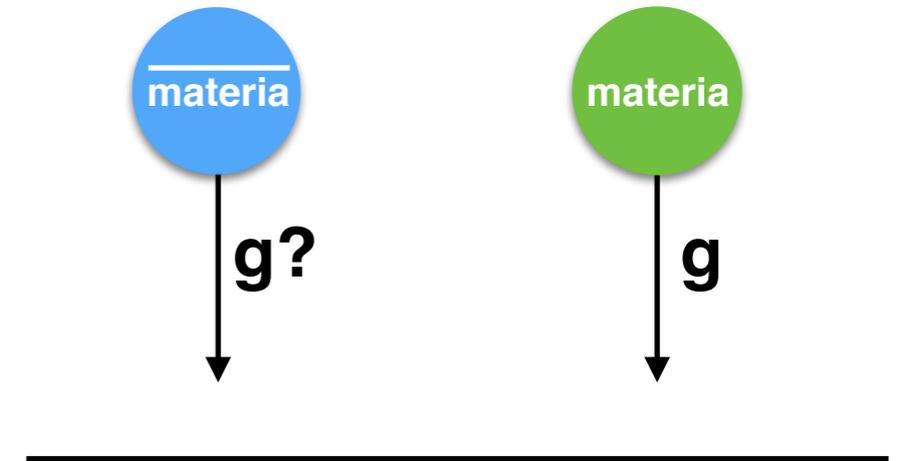
- Il principio di equivalenza (debole) vale anche per l'antimateria?

- Sulla Terra, l'antimateria cade con la stessa accelerazione dell materia?



- Il principio di equivalenza (debole) vale anche per l'antimateria?

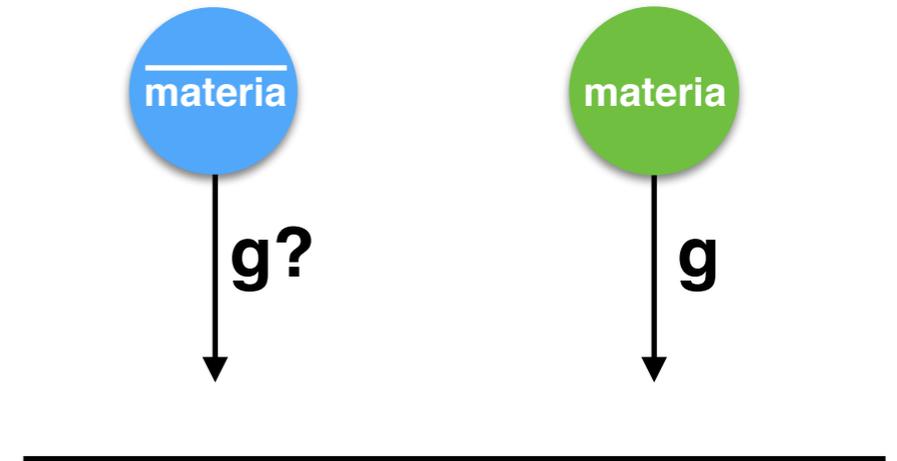
- Sulla Terra, l'antimateria cade con la stessa accelerazione dell materia?



- Intorno agli anni '50 iniziò ad essere popolare un'idea *fantascientifica*...

- Il principio di equivalenza (debole) vale anche per l'antimateria?

- Sulla Terra, l'antimateria cade con la stessa accelerazione dell materia?

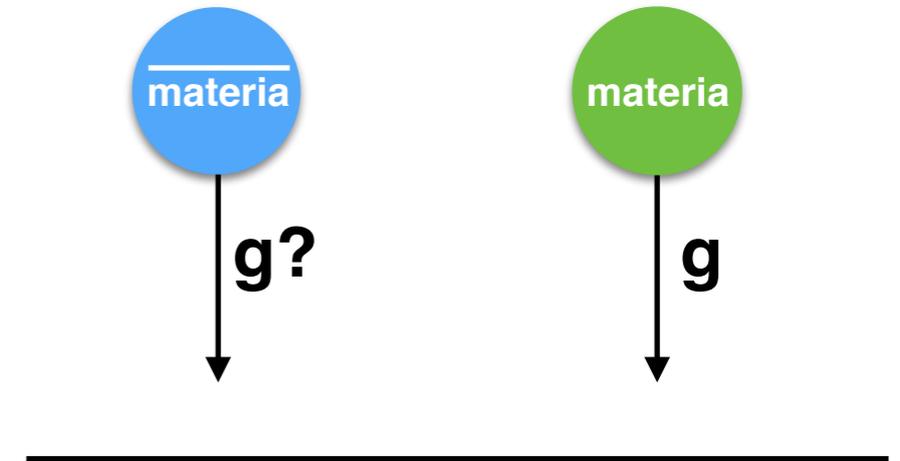


- Intorno agli anni '50 iniziò ad essere popolare un'idea *fantascientifica*...

**antigravità**

- Il principio di equivalenza (debole) vale anche per l'antimateria?

- Sulla Terra, l'antimateria cade con la stessa accelerazione dell materia?



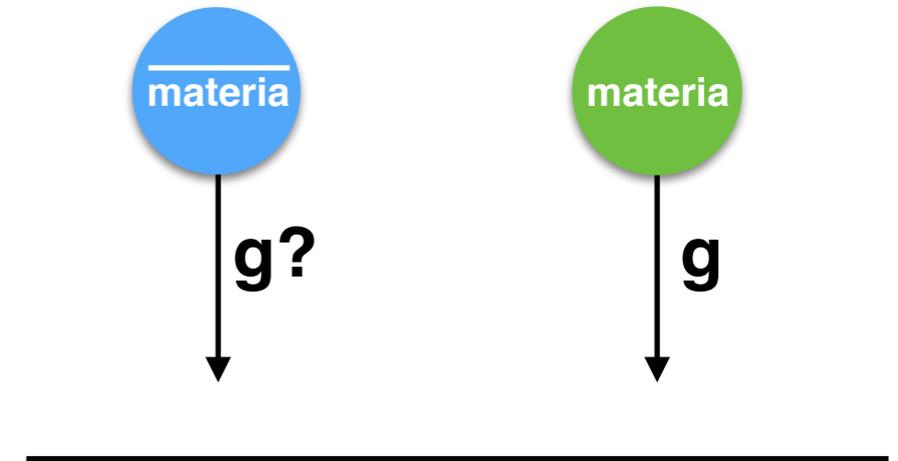
- Intorno agli anni '50 iniziò ad essere popolare un'idea *fantascientifica*...

**antigravità**

- Ma presenta notevoli *difficoltà* dal punto di vista teorico...

- Il principio di equivalenza (debole) vale anche per l'antimateria?

- Sulla Terra, l'antimateria cade con la stessa accelerazione dell materia?



- Intorno agli anni '50 iniziò ad essere popolare un'idea *fantascientifica*...

**antigravità**

- Ma presenta notevoli *difficoltà* dal punto di vista teorico...
- Oggi la maggior parte dei fisici ritiene che il principio di equivalenza valga anche per l'antimateria...ma va comunque verificato!

- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni

- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni
- Fairbank iniziò con gli elettroni, trovando un risultato interessante...

- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni
- Fairbank iniziò con gli elettroni, trovando un risultato interessante...

**Nessuna evidenza di forza gravitazionale!**

- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni
- Fairbank iniziò con gli elettroni, trovando un risultato interessante...

**Nessuna evidenza di forza gravitazionale!**

- Aveva scoperto una nuova Fisica?

- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni
- Fairbank iniziò con gli elettroni, trovando un risultato interessante...

**Nessuna evidenza di forza gravitazionale!**

- Aveva scoperto una nuova Fisica?
- No...semplicemente non aveva tenuto conto dei campi elettrici e magnetici residui all'interno del suo apparato

- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni
- Fairbank iniziò con gli elettroni, trovando un risultato interessante...

## **Nessuna evidenza di forza gravitazionale!**

- Aveva scoperto una nuova Fisica?
- No...semplicemente non aveva tenuto conto dei campi elettrici e magnetici residui all'interno del suo apparato
- È semplicemente impossibile rendere campi elettrici e magnetici trascurabili in esperimenti gravitazionali con cariche elettriche

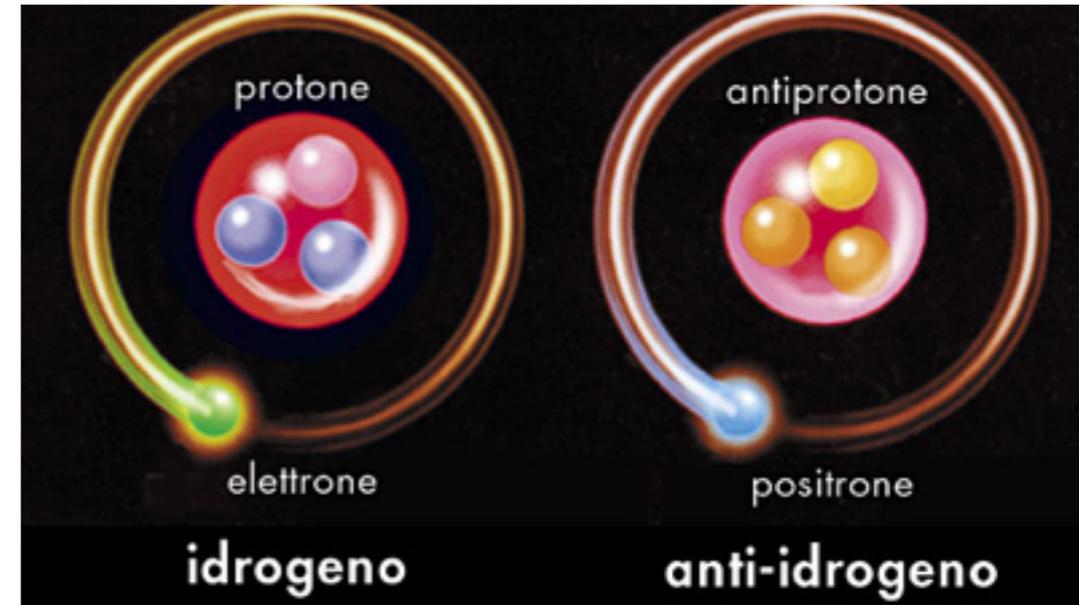
- Il primo esperimento in tal senso è stato svolto da Fairbank nel 1967 con elettroni e positroni
- Fairbank iniziò con gli elettroni, trovando un risultato interessante...

## **Nessuna evidenza di forza gravitazionale!**

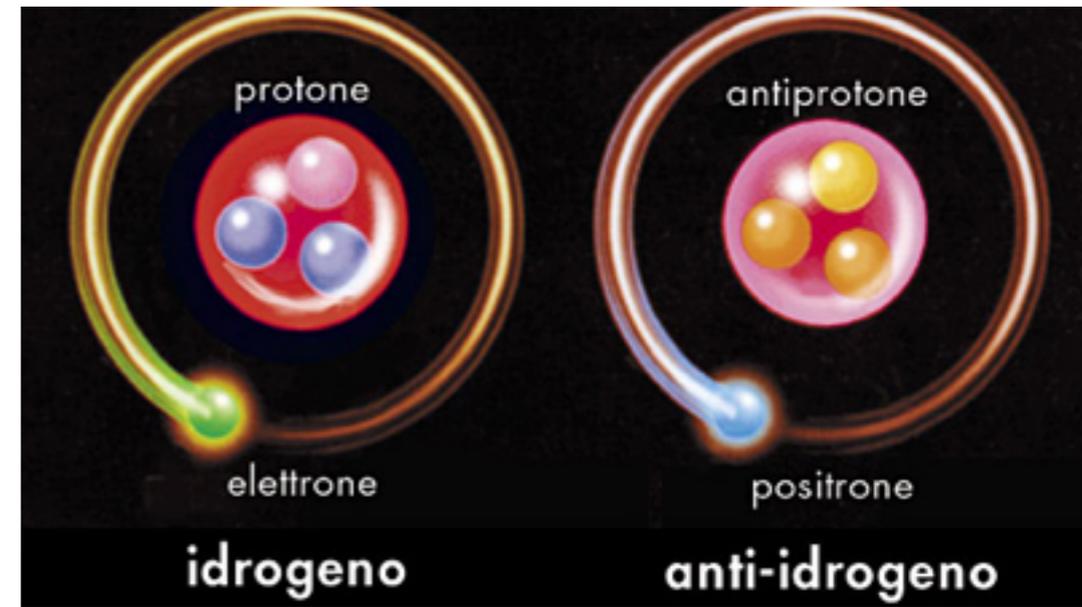
- Aveva scoperto una nuova Fisica?
- No...semplicemente non aveva tenuto conto dei campi elettrici e magnetici residui all'interno del suo apparato
- È semplicemente impossibile rendere campi elettrici e magnetici trascurabili in esperimenti gravitazionali con cariche elettriche

## **L'esperimento con i positroni non fu mai svolto da Fairbanks**

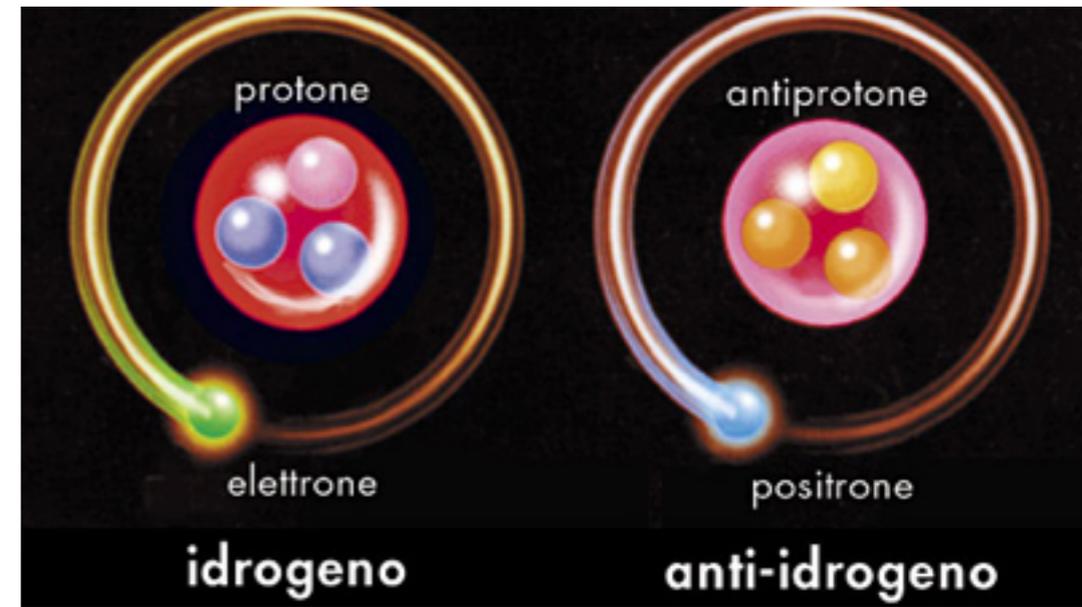
- L'esperimento **AEGIS** al CERN, vuole usare atomi di anti-idrogeno ( $\bar{H}$ ) per testare il principio di equivalenza



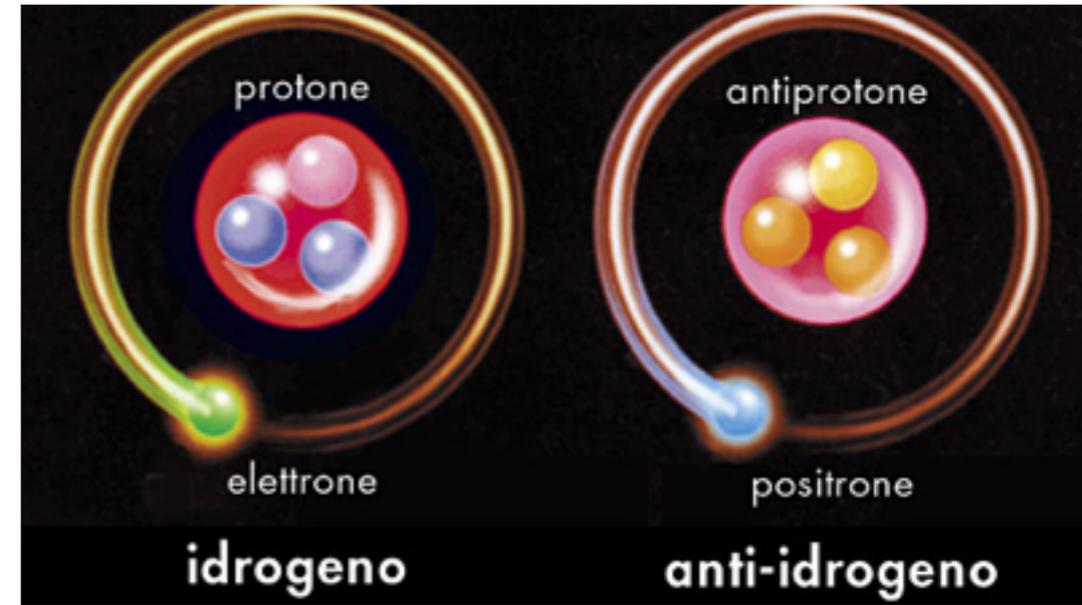
- L'esperimento **AEgIS** al CERN, vuole usare atomi di anti-idrogeno ( $\bar{H}$ ) per testare il principio di equivalenza
- **Perché  $\bar{H}$  sarebbe meglio di  $e^+$ ?**



- L'esperimento **AEgIS** al CERN, vuole usare atomi di anti-idrogeno ( $\bar{H}$ ) per testare il principio di equivalenza
- **Perché  $\bar{H}$  sarebbe meglio di  $e^+$ ?**
- Rispetto al positrone ha un vantaggio: è neutro!

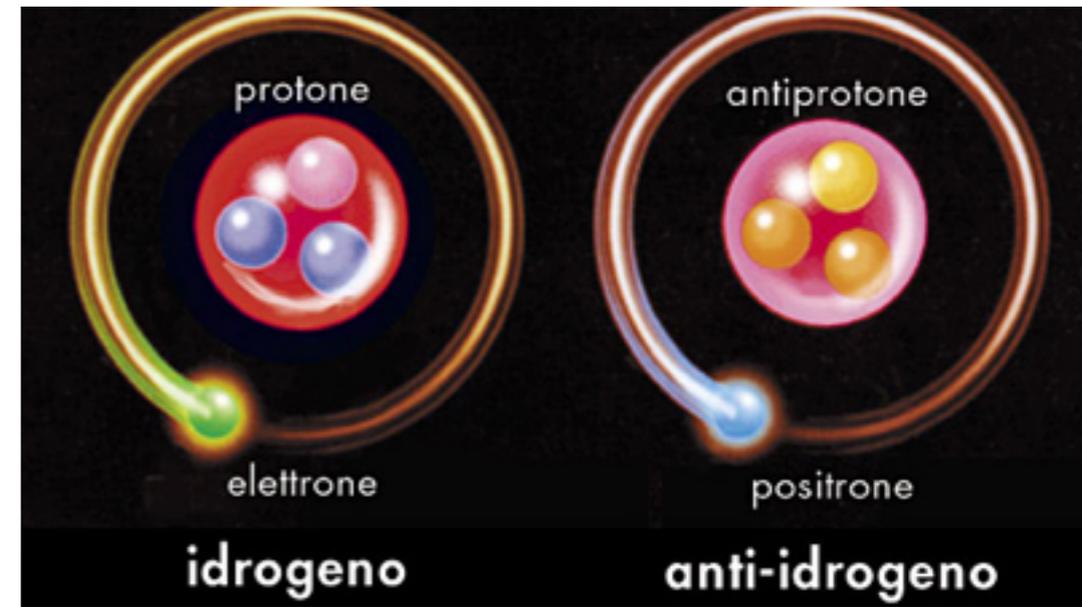


- L'esperimento **AEgIS** al CERN, vuole usare atomi di anti-idrogeno ( $\bar{H}$ ) per testare il principio di equivalenza
- **Perché  $\bar{H}$  sarebbe meglio di  $e^+$ ?**
- Rispetto al positrone ha un vantaggio: è neutro!
- Peccato che abbia molti svantaggi: difficoltà di produzione, costo elevato, difficoltà ad accelerarlo/decelerarlo, etc...



- L'esperimento **AEgIS** al CERN, vuole usare atomi di anti-idrogeno ( $\bar{H}$ ) per testare il principio di equivalenza

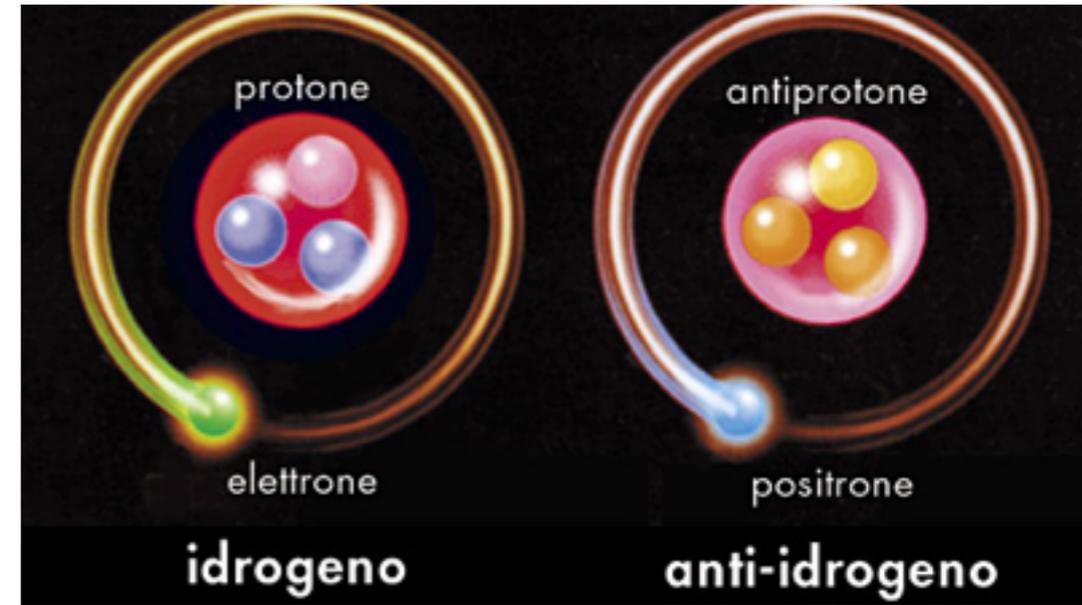
- **Perché  $\bar{H}$  sarebbe meglio di  $e^+$ ?**



- Rispetto al positrone ha un vantaggio: è neutro!
- Peccato che abbia molti svantaggi: difficoltà di produzione, costo elevato, difficoltà ad accelerarlo/decelerarlo, etc...
- Ma quel singolo vantaggio è decisivo...ricordate Fairbank?

- L'esperimento **AEgIS** al CERN, vuole usare atomi di anti-idrogeno ( $\bar{H}$ ) per testare il principio di equivalenza

- **Perché  $\bar{H}$  sarebbe meglio di  $e^+$ ?**



- Rispetto al positrone ha un vantaggio: è neutro!
- Peccato che abbia molti svantaggi: difficoltà di produzione, costo elevato, difficoltà ad accelerarlo/decelerarlo, etc...
- Ma quel singolo vantaggio è decisivo...ricordate Fairbank?
- Come si produce l'anti-idrogeno?

- Il metodo *classico* consiste nel sovrapporre un **plasma** di antiprotoni ed uno di positroni



- Il metodo *classico* consiste nel sovrapporre un **plasma** di antiprotoni ed uno di positroni



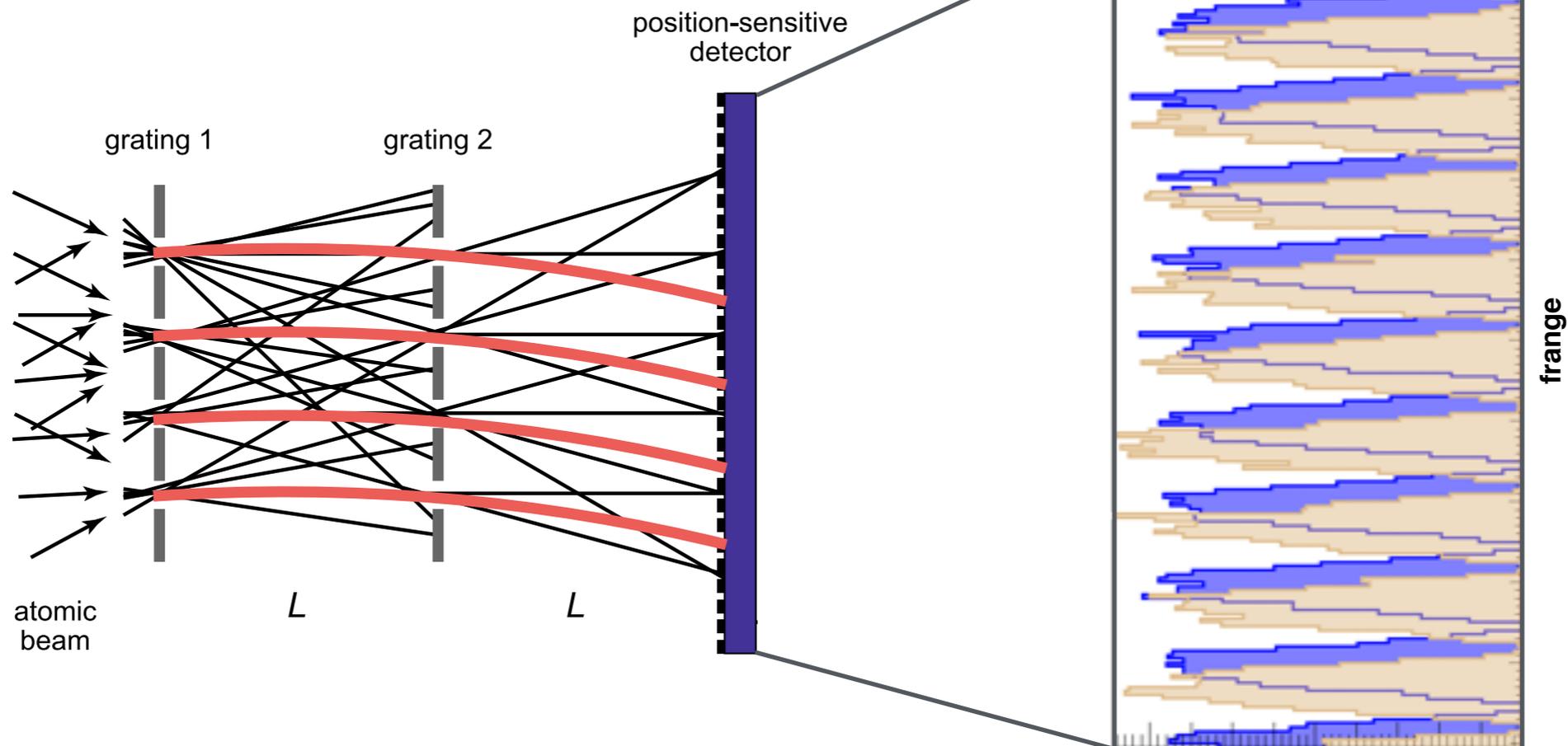
- AEgIS però utilizza un metodo diverso, chiamato **charge exchange**



- Il vantaggio è di riuscire a produrre anti-idrogeno in uno stato eccitato
  - È possibile accelerare gli atomi di  $\bar{H}$ !

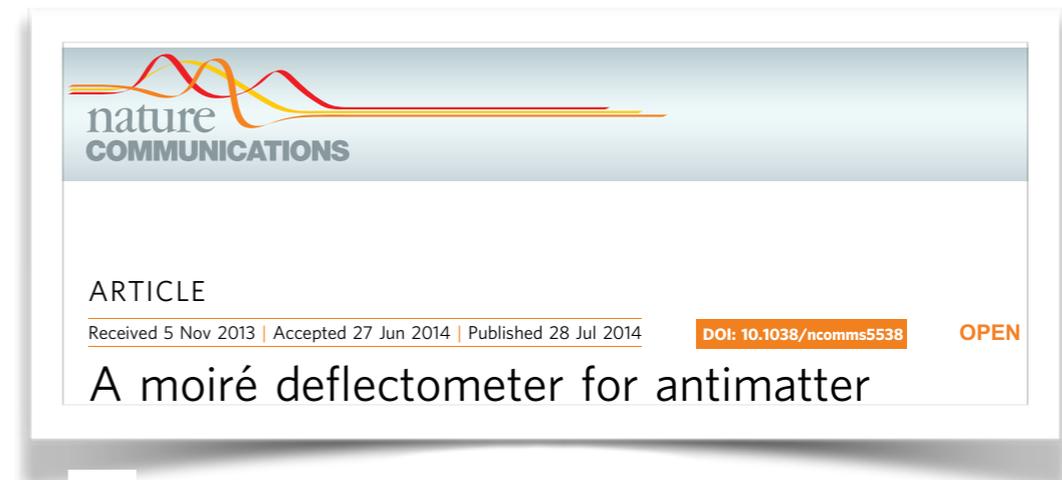
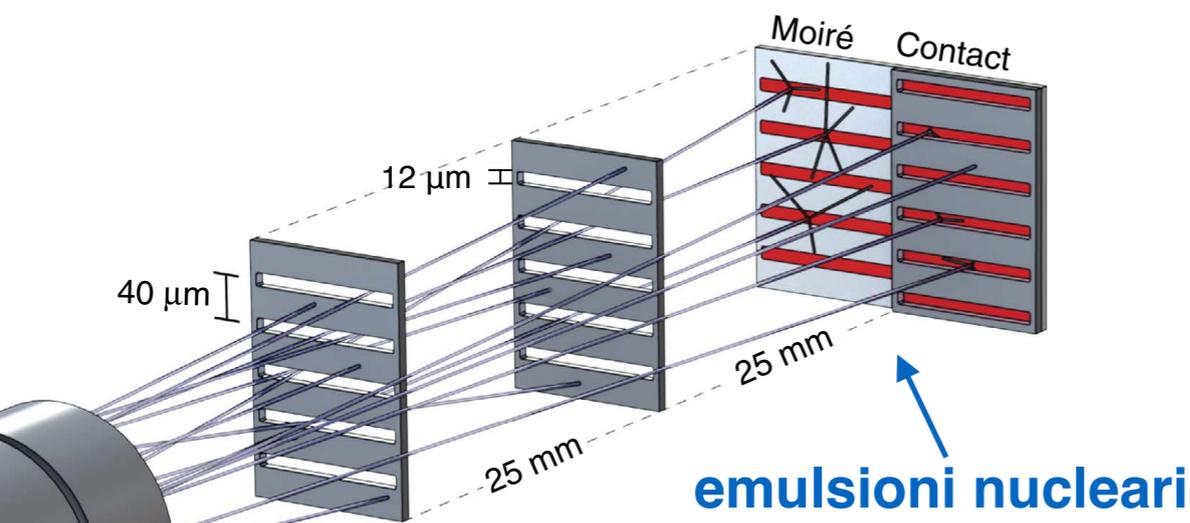
- Come misurare  $g$  per l'anti-idrogeno?

## Deflectometro di Moirè

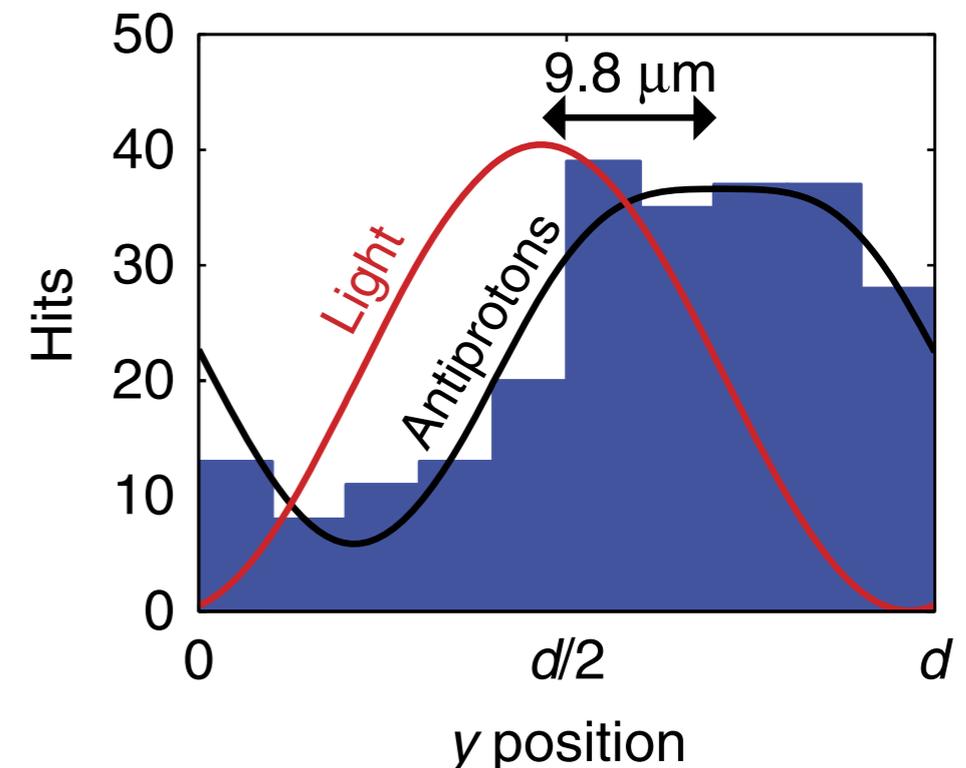


- Dalla misura dello spostamento delle frange misuriamo  $g$

- AEgIS produrrà H nel 2016 e farà la misura di g nei prossimi anni
- Il principio di funzionamento è stato verificato con anti-protoni
  - Abbiamo calcolato una forza misurando uno spostamento



- $F = 530 \pm 50 \text{ aN (stat.)} \pm 350 \text{ aN (syst.)}$
- consistente con  $B \sim 7.4 \text{ G}$
- misurato  $B \sim 10 \text{ G}$



**La RG è in accordo con tutte le misure sperimentali...**

**La RG è in accordo con tutte le misure sperimentali...**

...con un'eccezione... **...l'anomalia Pioneer**

## La RG è in accordo con tutte le misure sperimentali...

...con un'eccezione...

...**l'anomalia Pioneer**

- Le sonde Pioneer 10 e Pioneer 11 furono lanciate rispettivamente nel 1972 e 1973



## La RG è in accordo con tutte le misure sperimentali...

...con un'eccezione... **...l'anomalia Pioneer**

- Le sonde Pioneer 10 e Pioneer 11 furono lanciate rispettivamente nel 1972 e 1973
- Dopo aver superato le 20 ua di distanza dalla terra entrambe le sonde registravano un'accelerazione anomala...

$$\sim 9 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$$



## La RG è in accordo con tutte le misure sperimentali...

...con un'eccezione...

...l'anomalia Pioneer



- Le sonde Pioneer 10 e Pioneer 11 furono lanciate rispettivamente nel 1972 e 1973
- Dopo aver superato le 20 ua di distanza dalla terra entrambe le sonde registravano un'accelerazione anomala...

$$\sim 9 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$$

- Sebbene alcuni fisici ritengano che questo effetto possa essere un indizio su una non perfetta descrizione dell'Universo da parte della RG

## La RG è in accordo con tutte le misure sperimentali...

...con un'eccezione...

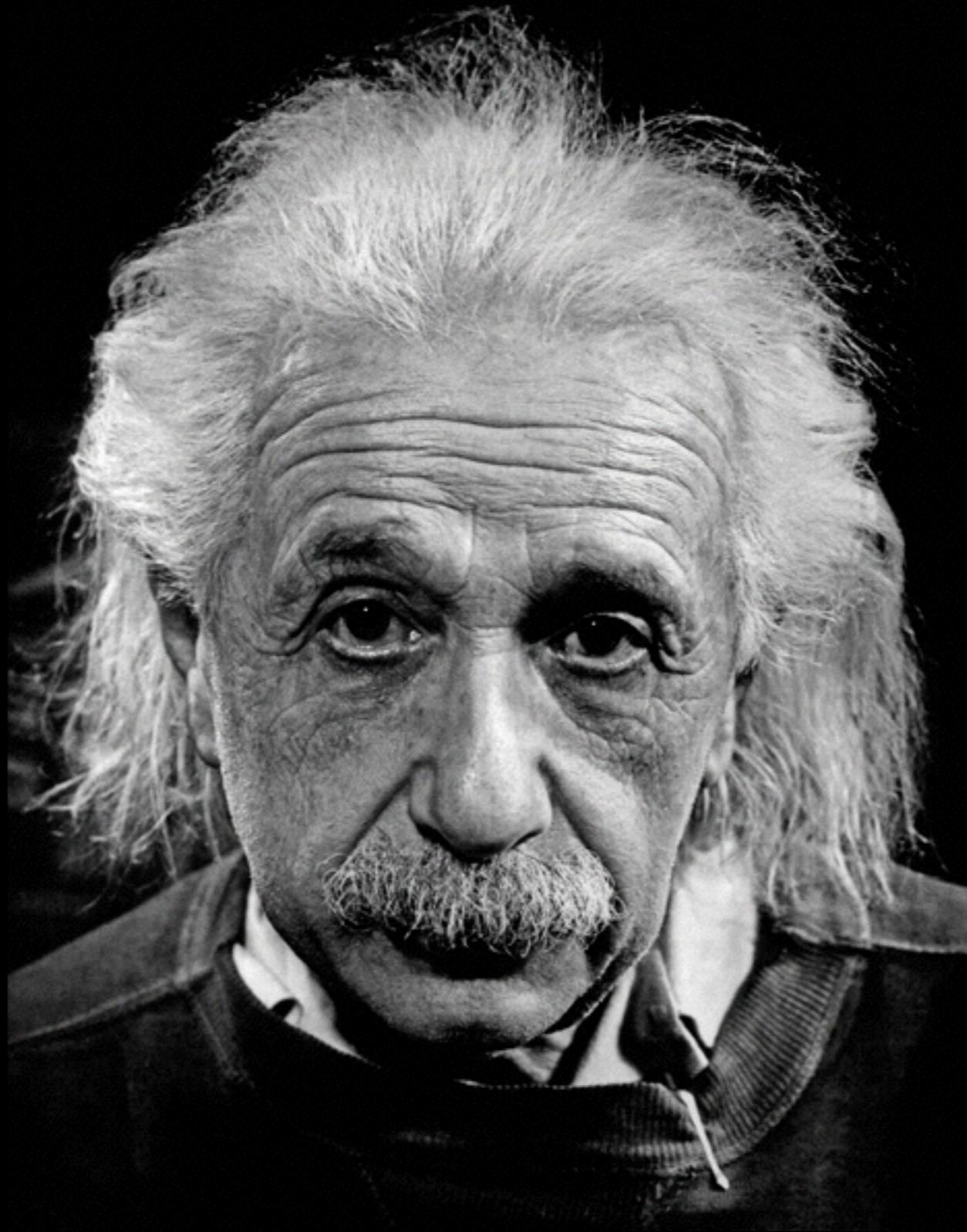
...**l'anomalia Pioneer**



- Le sonde Pioneer 10 e Pioneer 11 furono lanciate rispettivamente nel 1972 e 1973
- Dopo aver superato le 20 ua di distanza dalla terra entrambe le sonde registravano un'accelerazione anomala...

$$\sim 9 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$$

- Sebbene alcuni fisici ritengano che questo effetto possa essere un indizio su una non perfetta descrizione dell'Universo da parte della RG
- La maggior parte della comunità scientifica ritiene che questa anomalia sia dovuta ad un effetto termico



*Philippe Halsman, 1947*