

# Le Onde Gravitazionali

Marco G. Giammarchi

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Via Celoria 16 – 20133 Milano (Italy)

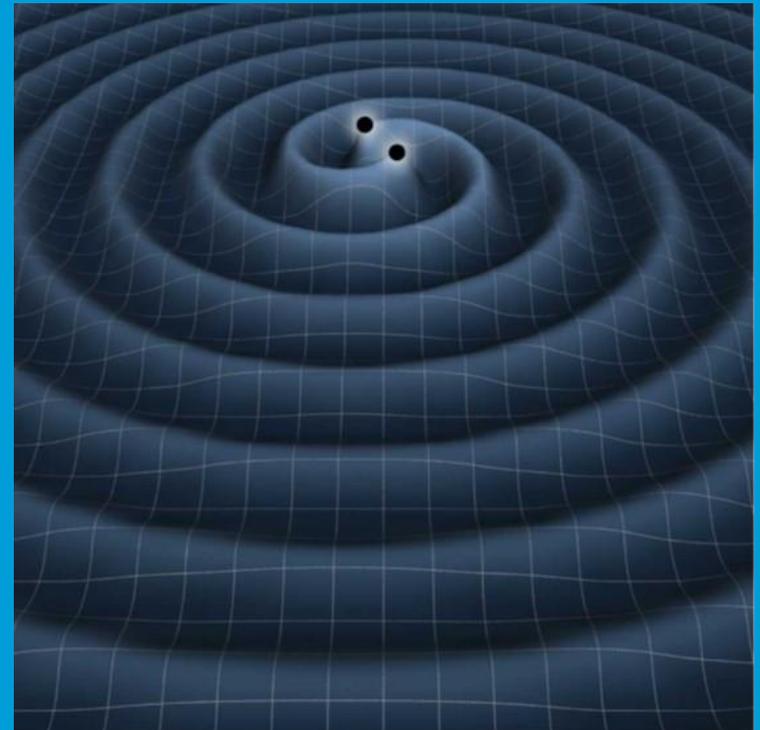
[marco.giammarchi@mi.infn.it](mailto:marco.giammarchi@mi.infn.it)

<http://pcgiammarchi.mi.infn.it/giammarchi/>



- Le Interazioni Fondamentali
- La Gravità di Newton
- La Gravità di Einstein: la Teoria della Relatività Generale
- Scoperta delle Onde Gravitazionali  
GW150914, GW151226, (LVT151012)

Disclaimer: lo speaker non è uno degli autori della scoperta





## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

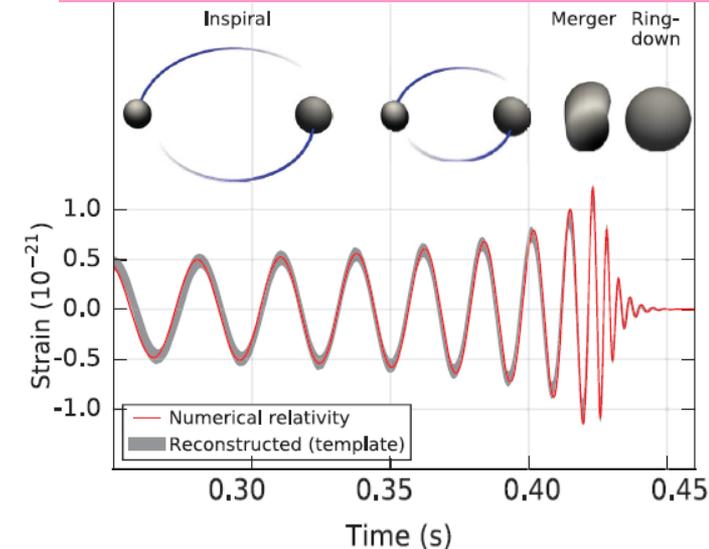
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

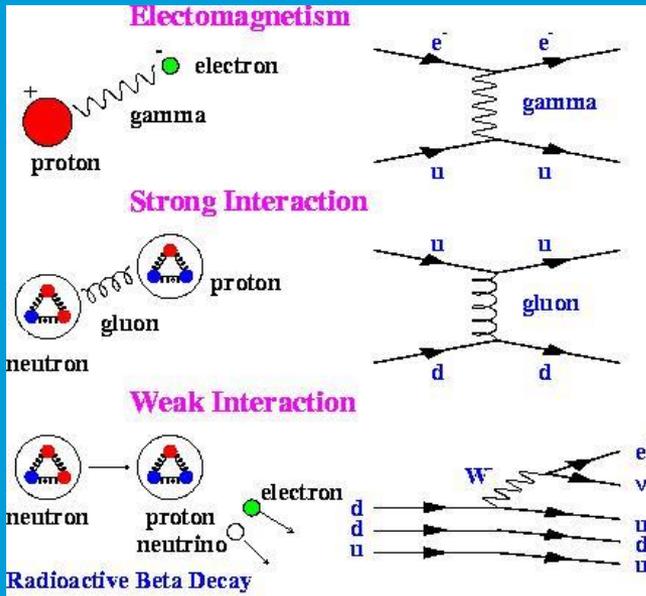
- I rivelatori di LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) hanno osservato onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di masse stellari.
- La forma d'onda rivelata è in accordo con le predizioni della relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri e l'assestamento del buco nero risultante.
- Questa osservazione dimostra l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di masse stellari.
- Questa è la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione di un sistema binario di buchi neri coalescenti.



11 Febbraio Press Conference



Lo studio delle proprietà del cosmo (delle particelle) acquista la sua piena prospettiva se illustrato alla luce delle proprietà delle particelle (del cosmo).



$$l = 10^{-18} \text{ m}$$

$$t = 10^{-23} \text{ s}$$

Microcosmo



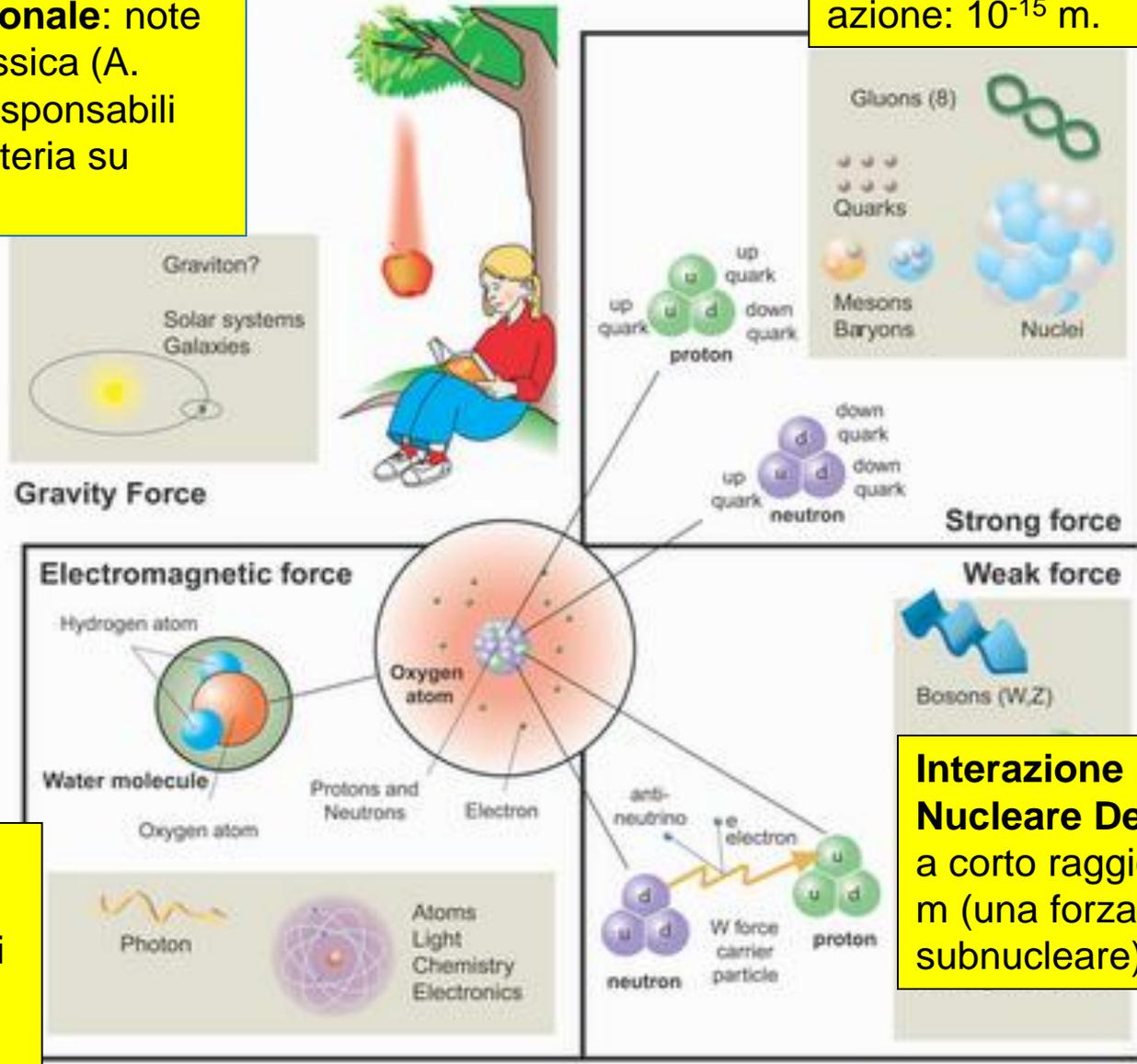
$$l \geq 4300 \text{ Mpc}$$

$$t = 13.8 \times 10^9 \text{ y}$$

Macrocosmo

# 1. Le Interazioni Fondamentali

**Interazione Gravitazionale:** nota da sempre. Teoria classica (A. Einstein) nel 1915. Responsabili della stabilità della materia su scala macroscopica.



**Interazione Nucleare Forte:** a corto raggio di azione:  $10^{-15}$  m.

**Interazione Elettromagnetica:** Riguarda le interazioni tra particelle cariche (stabilità atomica).

**Interazione Nucleare Debole:** a corto raggio:  $10^{-16}$  m (una forza subnucleare).

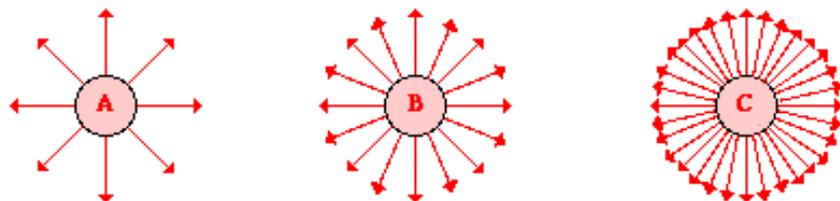
Nelle teorie quantistiche moderne il concetto di forza non è più quello classico. L'interazione è rappresentata dallo scambio di quanti

In Fisica Classica :

- Azione a distanza
- Campo (Faraday, Maxwell)

$$F = \frac{k}{r^2}$$

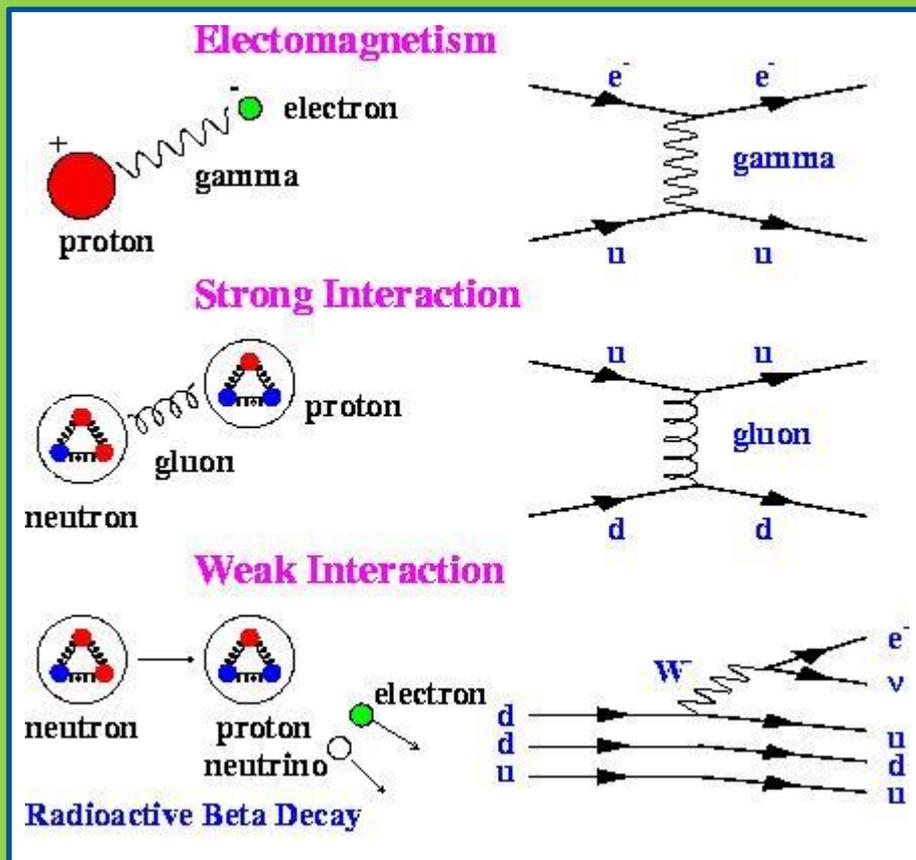
Density of Lines in Patterns



The density of electric field lines around these three objects reveals that the quantity of charge on C is greater than that on B which is greater than that on A.

In Fisica Quantistica :

- Scambio di Quanti



## La Gravità è un caso a parte (almeno per ora) :

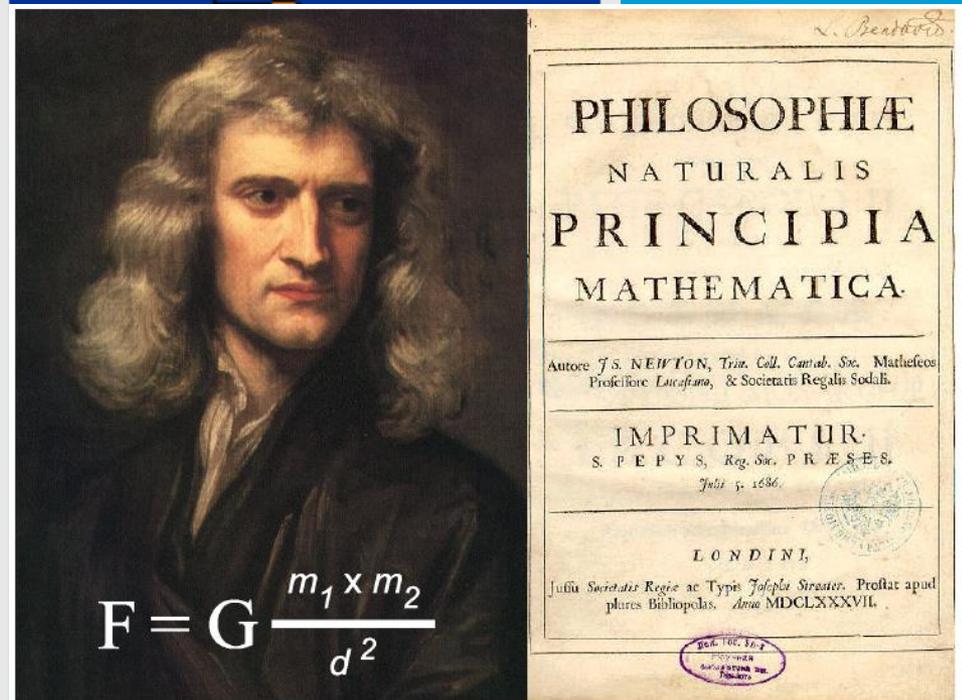
- La Gravità è assai meno intensa delle altre forze su scala microscopica
- La Gravità si comporta allo stesso modo per tutti i corpi
- Della Gravità al momento non abbiamo alcuna teoria quantistica
- La Gravità è la forza decisiva in azione nell'Universo



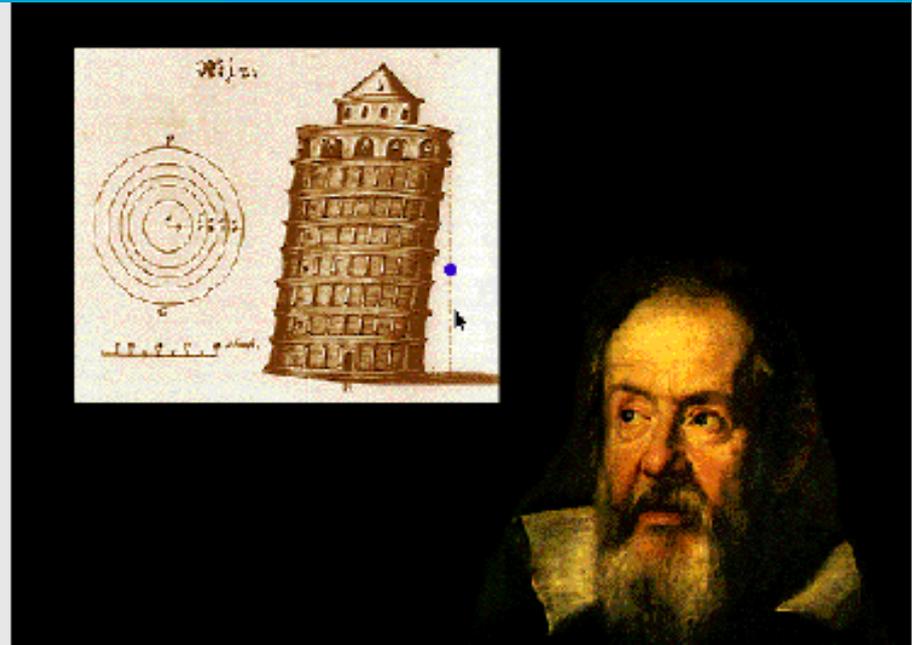
## 2. La Gravità di Newton

### La Gravitazione Universale

- **Risolve gran parte dei fenomeni osservati a Terra e nel Cielo**
  - » **L'orbita dei pianeti e delle comete**
  - » **La cause delle maree**
  - » **Il moto della Luna e la perturbazione dovuta alla Gravita' del Sole**
- **Giunge ad una visione unitaria del lavoro di Galileo Copernico e Keplero.**



# ***Inerzia e Gravitazione: il principio di Equivalenza***



▪ ***Massa Inerziale*** \* **Accelerazione**

**=**

***Massa Gravitazionale*** \* **Campo d'attrazione  
Gravitazionale**

▪ ***L'eguaglianza tra Massa Inerziale e Massa Gravitazionale fa sì che tutti i corpi cadano con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro natura***

# Una forza «diversa»

La Relatività Generale è una teoria della Gravitazione che rispetta il principio di equivalenza (Albert Einstein, 1915).

## Campo E

(in un campo elettrico)

$$F = qE$$

$$F = ma$$

$$qE = ma$$

$$a = \frac{qE}{m}$$

Il moto dipende da come è fatta la particella

## Campo G

(in un campo g)

$$F = mg$$

$$F = ma$$

$$mg = ma$$

$$a = g$$

Il moto NON dipende da come è fatta la particella

Immaginiamo una particella  $m, q$  che si muova in un campo elettrico o uno gravitazionale

Ma se la gravitazione non dipende da nessuna caratteristica del corpo allora essa è una proprietà dello spaziotempo.

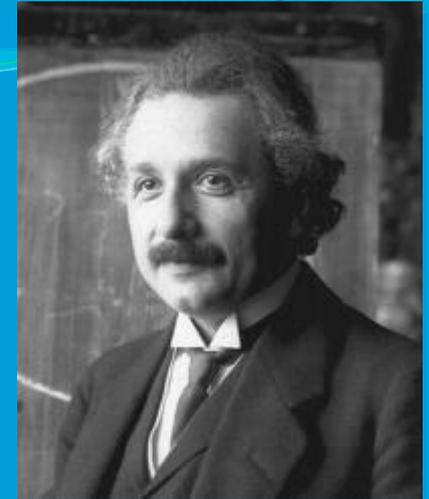
Teoria geometrica della gravità.  
Curvatura dello spaziotempo

### 3. La Gravità di Einstein

La Relatività Generale è una teoria geometrica della Gravità proposta da Albert Einstein nel 1915

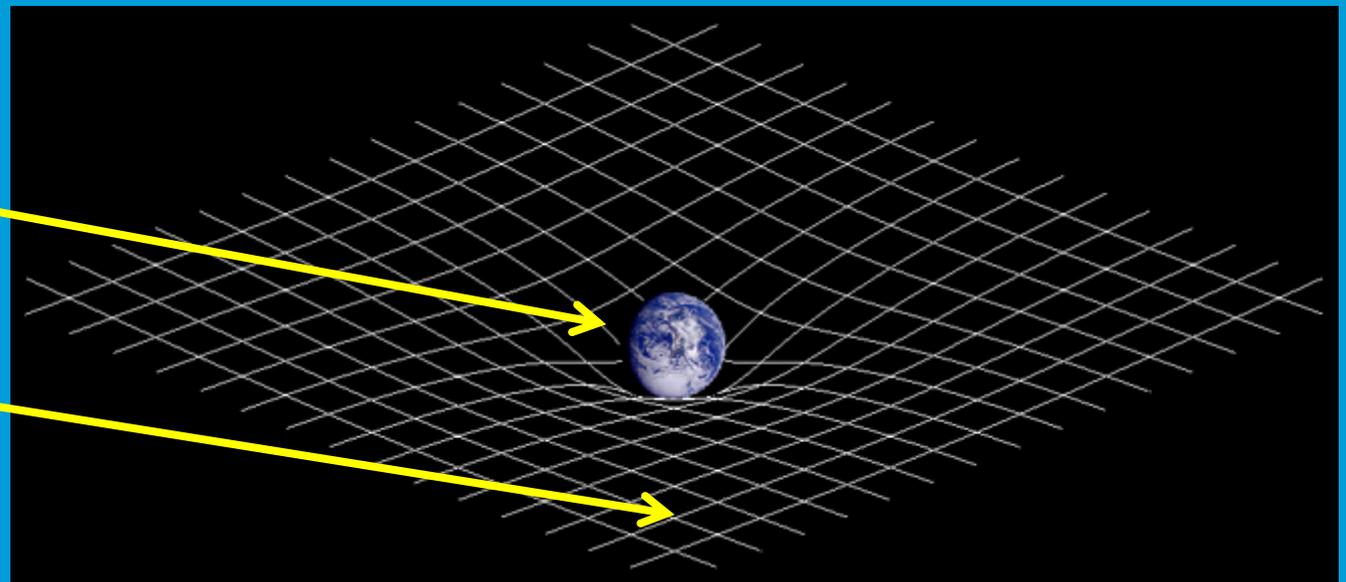
La Relatività Generale comprende la Relatività Speciale e la Teoria Newtoniana della Gravitazione.

La gravità è descritta come una proprietà geometrica dello spaziotempo.



Massa  
Energia

Rappresentazione  
dello spaziotempo



# Il concetto di interazione elementare

Newton

Azione a distanza (1680)

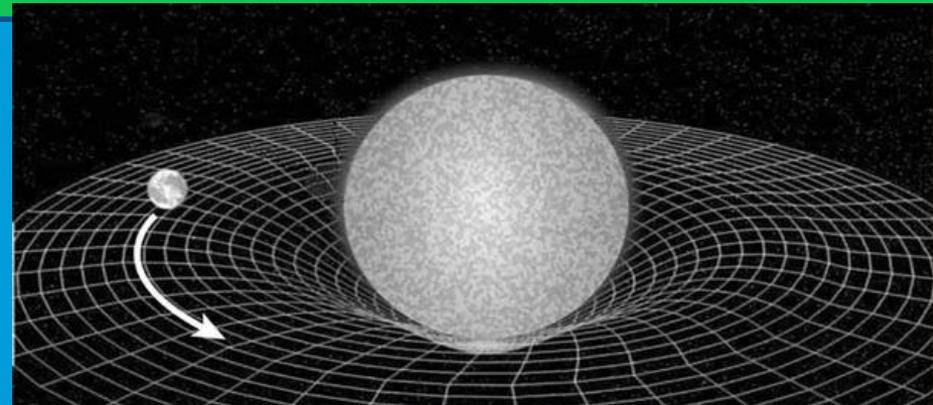
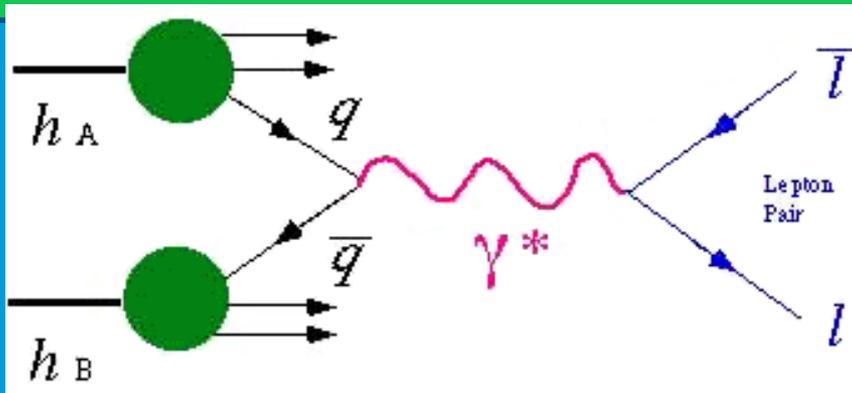
Faraday

Il Campo (1860)

Maxwell

Campi quantistici  
(scambio di quanti)

Gravità  
(curvatura dello spaziotempo)



La curvatura dello spaziotempo è correlata a energia/momento di materia e radiazione  
 Questa correlazione è data dalle Equazioni di Einstein

Tensore di Einstein

Costante cosmologica

Tensore Energia-Momento

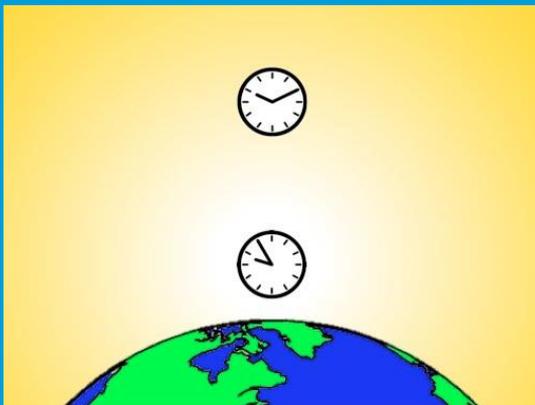
Tensore metrico

$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = G_{\mu\nu}(\partial_\theta \partial_\varepsilon g_{\alpha\beta})$$

La massa (l'energia-momento) curva lo spaziotempo.  
 Tempo e Spazio non più determinati in modo indipendente dall'energia/momento

1) Lo scorrere del tempo dipende dalla presenza o meno di campi gravitazionali. Il tempo non è unico.

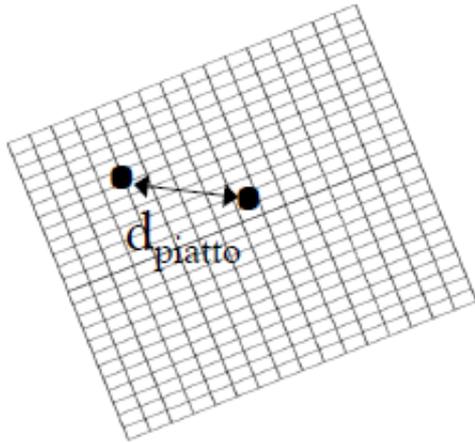


Gravità diverse  
 ←→  
 Tempi diversi

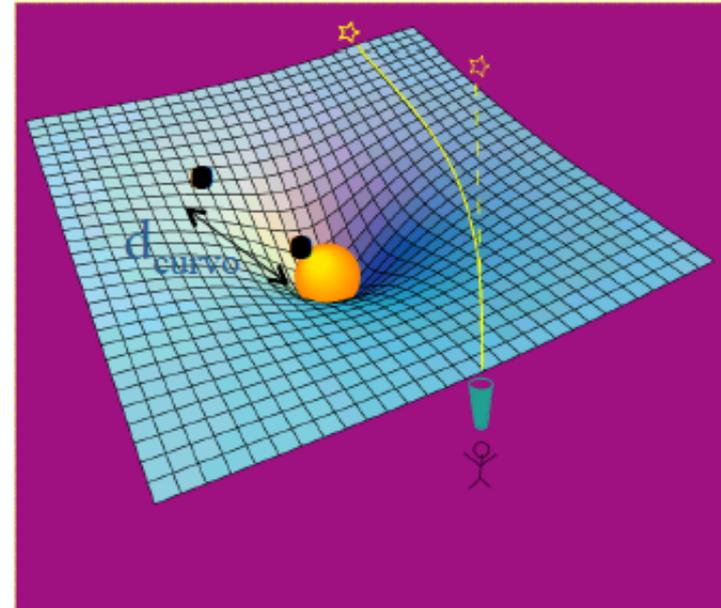


## 2) La struttura dello spazio dipende dalla presenza di campi gravitazionali.

Cosa intendiamo dicendo che le masse (e l'energia) curvano lo spaziotempo



Distanza tra due punti nello spazio piatto



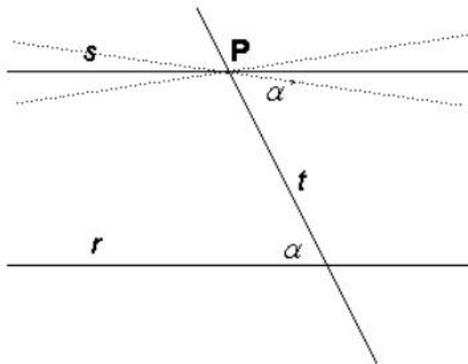
Spazio “curvato” dalla massa: la distanza tra i due punti varia

Quando le masse si muovono, esplodono, interagiscono, la distanza tra punti cambia nel tempo: le onde gravitazionali sono increspature nella curvatura dello spaziotempo prodotte dal moto di massa-energia, che si propagano nello spazio alla velocità della luce

# Una geometria diversa

## Enunciato

Data una retta  $r$  ed un punto  $P$  esterno ad essa, esiste una sola retta  $s$  parallela ad  $r$  e contenente  $P$ .



Per il quinto, detto postulato delle parallele, che in forma più semplice equivale a dire che: "Per un punto è possibile tracciare una sola retta parallela ad una retta data"

Lo stesso Euclide dubitò della validità di esso: infatti lo utilizzò nella dimostrazione del teorema della somma degli angoli interni di un triangolo ed evitò il più possibile di richiamarlo in altre dimostrazioni.

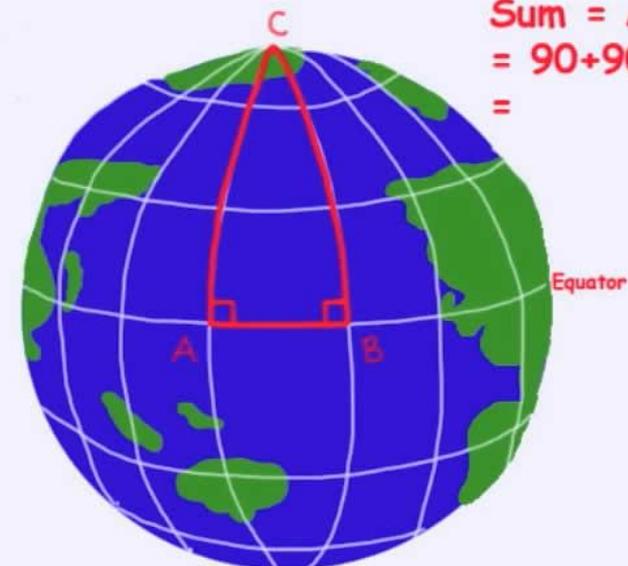
Per molto tempo i matematici furono convinti che il quinto postulato di Euclide non fosse indipendente dagli altri e fosse perciò dimostrabile come teorema: ci furono tanti tentativi di dimostrarlo e di sostituirlo con nuovi postulati ma tutte le sostituzioni si rivelarono equivalenti ad esso.

Ma alcuni matematici arrivarono persino alla negazione di tale postulato, dando vita alle GEOMETRIE NON EUCLIDEE.

Sulla superficie della sfera i due «meridiani» che partono da A e B sono paralleli. Ma si incontrano al Polo!

La somma degli angoli interni del triangolo ABC supera 180 gradi!

## What about on a sphere?



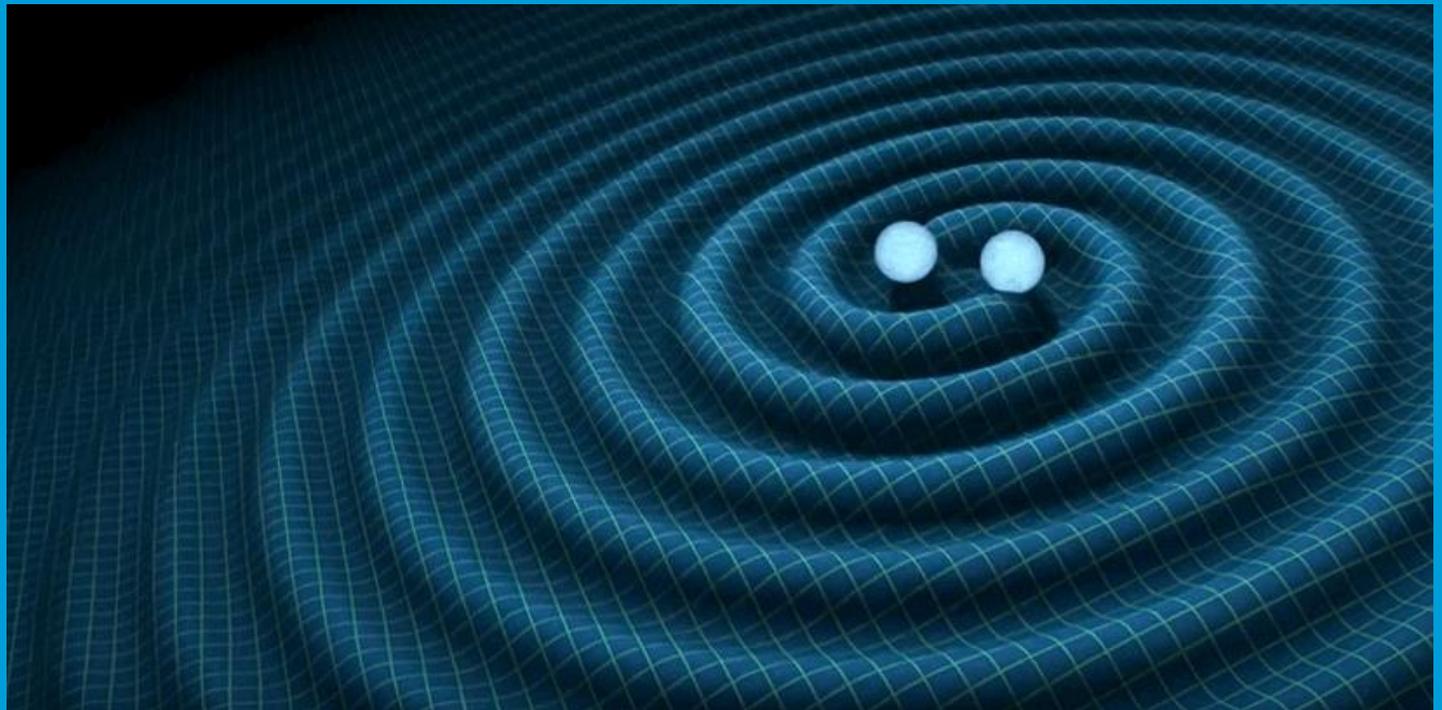
$$\begin{aligned} \text{Sum} &= A+B+C \\ &= 90+90+ \_ \\ &= \end{aligned}$$

La teoria moderna della Gravità classica viene usata per descrivere tutto l'Universo. Dalle mele alle Galassie. Quali ne sono i limiti e i problemi aperti?

1. Non esiste una valida teoria quantistica della Gravità
2. La Gravità non è ancora stata verificata in certi regimi (campi molto forti)
3. Onde Gravitazionali: non rivelate direttamente fino al 2016

Onde Gravitazionali : perturbazioni dello spaziotempo dovute al movimento delle masse (energie). Si propagano alla velocità della luce.

Esempio:  
due stelle di  
neutroni che  
orbitano  
rapidamente  
l'una intorno  
all'altra

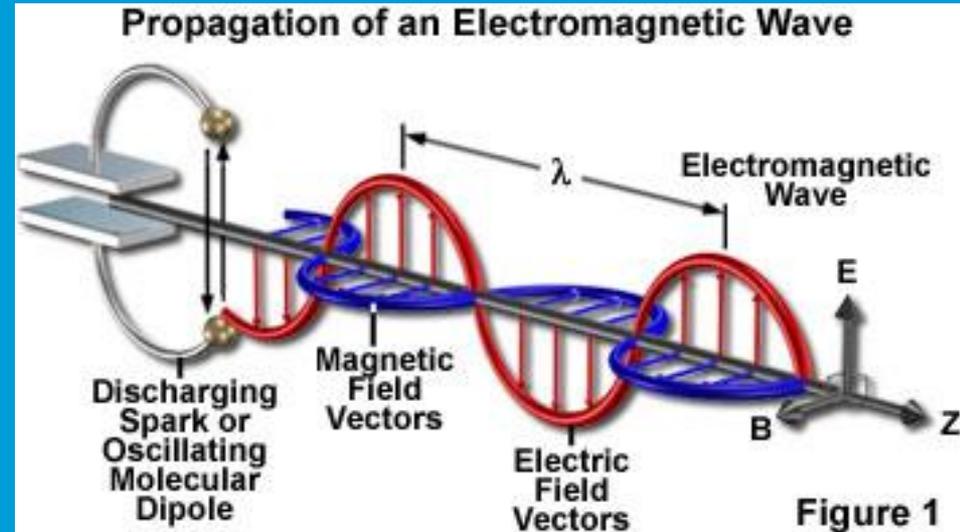


## 4. La ricerca delle Onde Gravitazionali

Il Radiatore Elettromagnetico (dipolo oscillante)

Cariche in movimento emettono onde elettromagnetiche

Scoperte da Hertz nel 1886



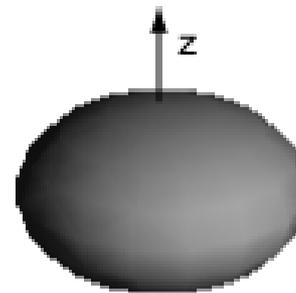
Radiatore gravitazionale (quadrupolo oscillante)

Masse in movimento emettono onde gravitazionali

Non scoperte prima del 11-Feb-2016



$Q > 0$   
Prolate



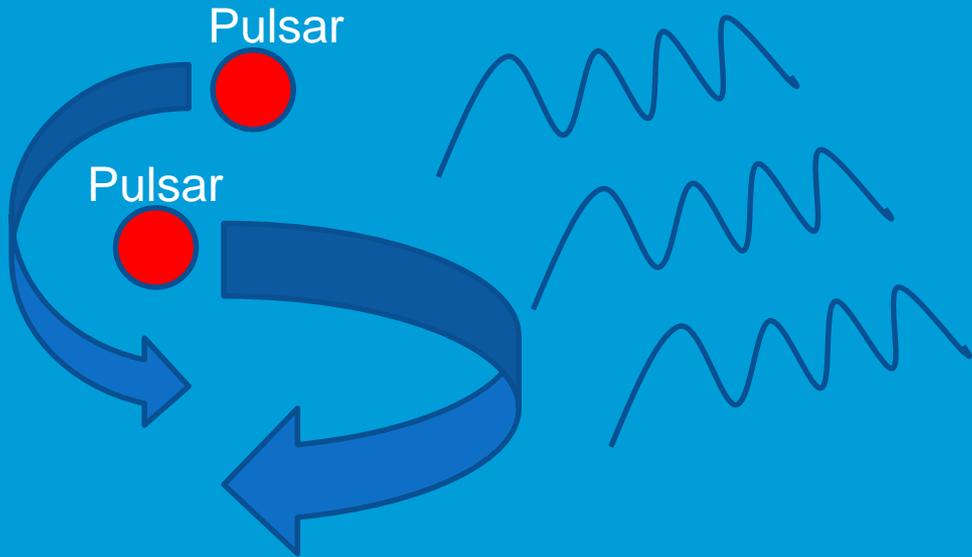
$Q < 0$   
Oblate

Classical definition

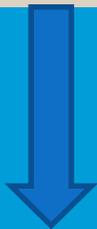
$$Q_0 = \int \rho(3z^2 - r^2)dV$$

Momento di  
Quadrupolo

Consideriamo ora un sistema di due oggetti molto compatti in orbita reciproca :



In base alla teoria un sistema gravitante (due stelle compatte e pesanti) in orbita emette onde gravitazionali



Ma così facendo il sistema perde energia! E le velocità delle due pulsar devono cambiare !



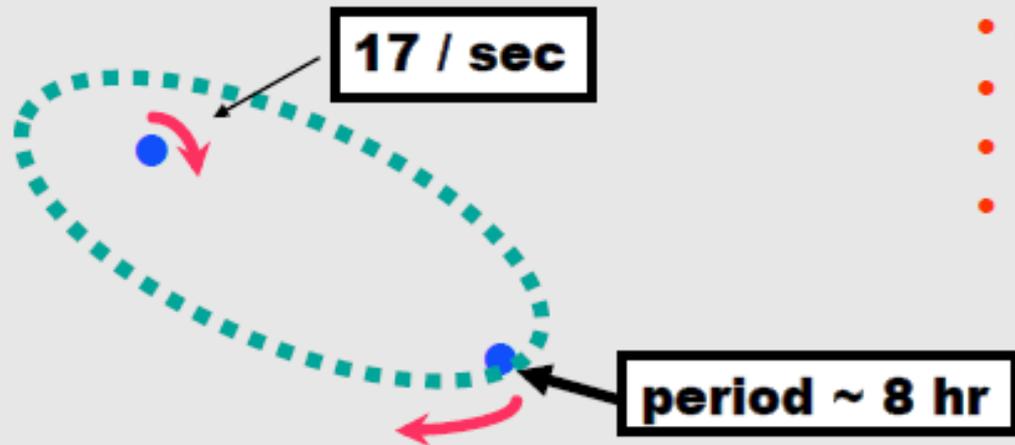
L'effetto può essere rivelato!



Si può così ottenere evidenza **INDIRETTA** dell'esistenza delle Onde Gravitazionali!

# Evidenza dell'esistenza delle Onde Gravitazionali

*Hulse & Taylor*



**PSR 1913 + 16**  
**Timing of pulsars**

## Sistema binario di stelle compatte

- separazione  $\sim 10^6$  km
- $m_1 = 1.4$  masse solari
- $m_2 = 1.36$  masse solari
- eccentricità = 0.617

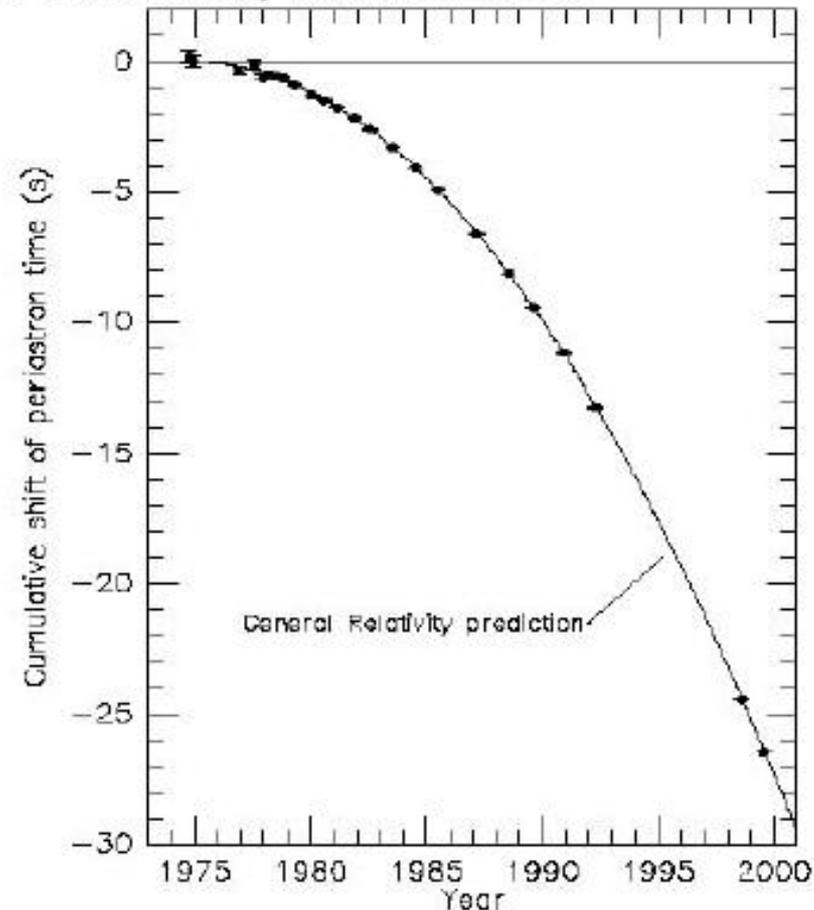
## Predizione della Relatività Generale

- riduzione progressiva dell'orbita 3 mm/orbita

# Evidenza “indiretta” d’esistenza delle Onde Gravitazionali



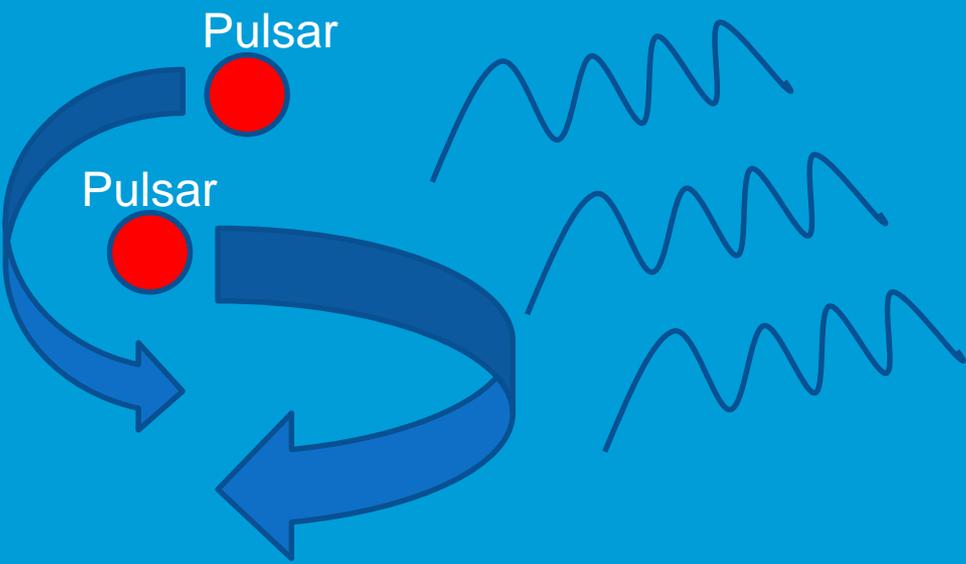
Comparison between observations of the binary pulsar PSR1913+16, and the prediction of general relativity based on loss of orbital energy via gravitational waves



From J. H. Taylor and J. M. Weisberg, unpublished (2000)

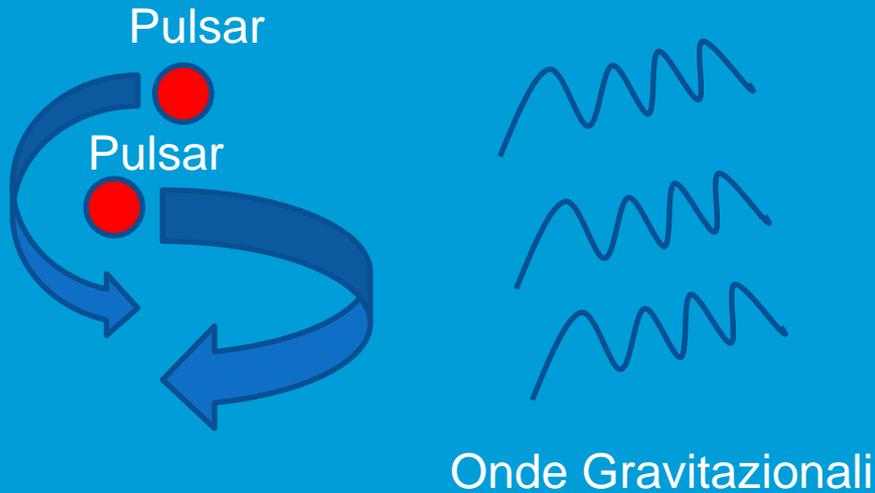
Vi è una perdita di energia che è pari a quella che la teoria prevede per emissione di onde gravitazionali. Questa è una evidenza indiretta.

# Evidenza diretta: rivelazione delle Onde Gravitazionali



Si tratta di osservare l'effetto delle Onde Gravitazionali sulla Terra.  
(Su un rivelatore a Terra)

La ricerca delle Onde Gravitazionali  
o meglio, della loro evidenza diretta



Rivelatore a Terra



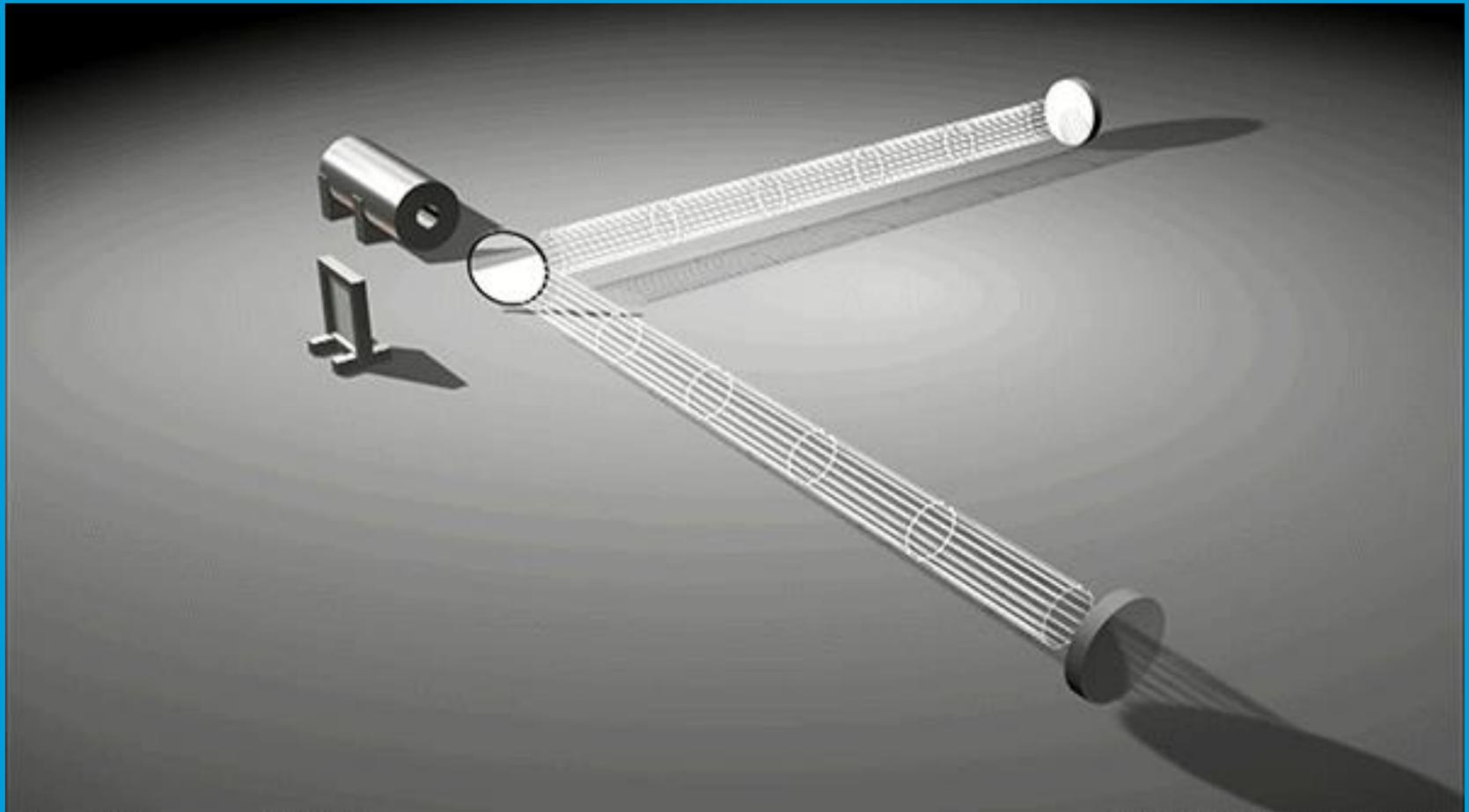
**1960** J. Weber inventa e analizza la fisica dei  
rivelatori risonanti

J. Weber- Generation and detection of g.w. - Phys. Rev. **117**, 306 (1960)

I primi rivelatori furono barre risonanti criogeniche (in Europa proposte dal gruppo di E. Amaldi). Poi superate in sensibilità dagli interferometri.

I rivelatori più sensibili di Onde Gravitazionali attualmente sono gli interferometri

Al passaggio di una onda gravitazionale, lo spazio viene esteso e compresso alternativamente. «Sembra» che i bracci dell'interferometro di allontanino e poi si avvicinino periodicamente.



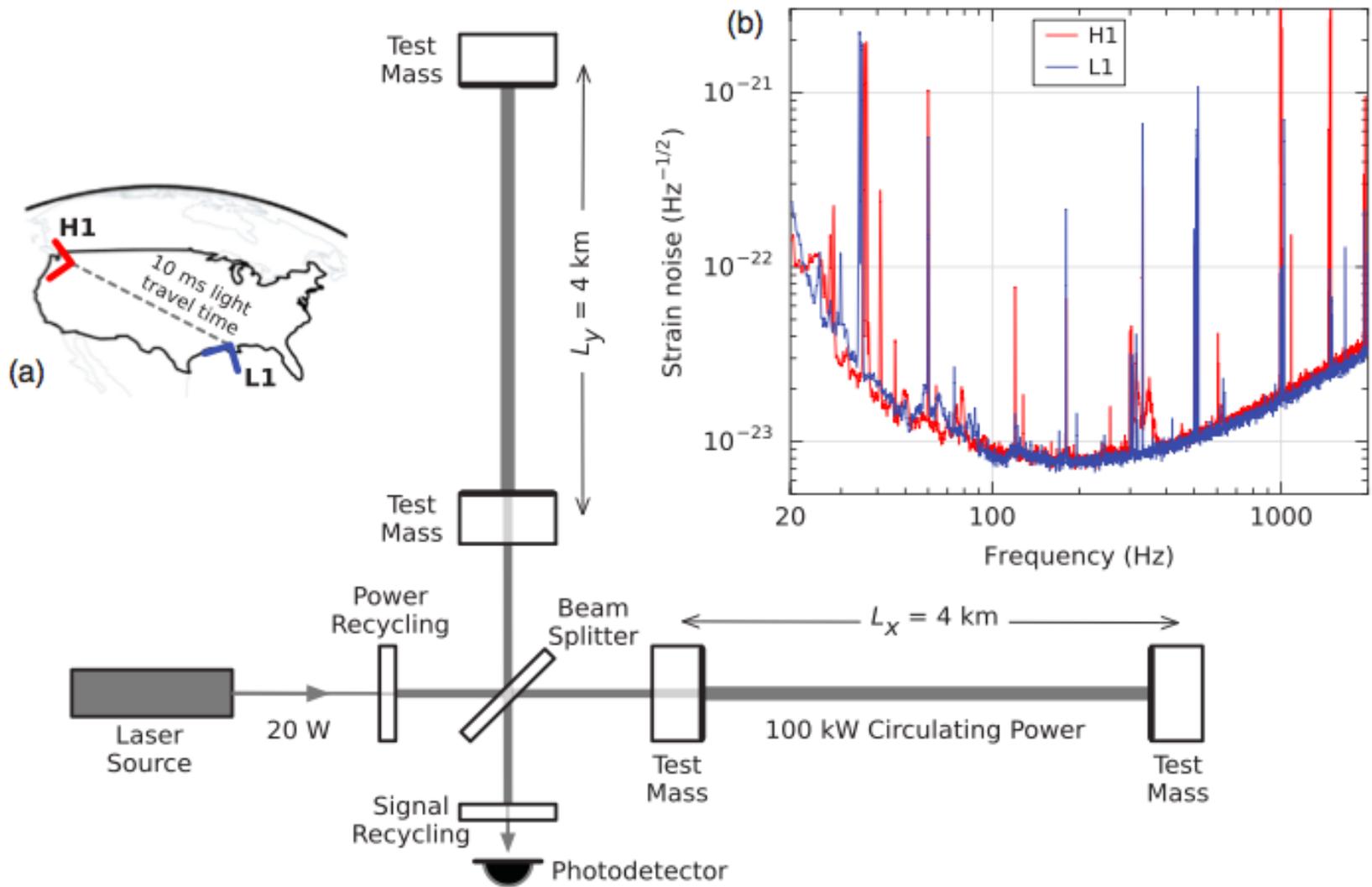
**EGO - Virgo**



L'Interferometro italo-francese  
VIRGO (Cascina, Pisa) per la  
rivelazione delle Onde  
Gravitazionali



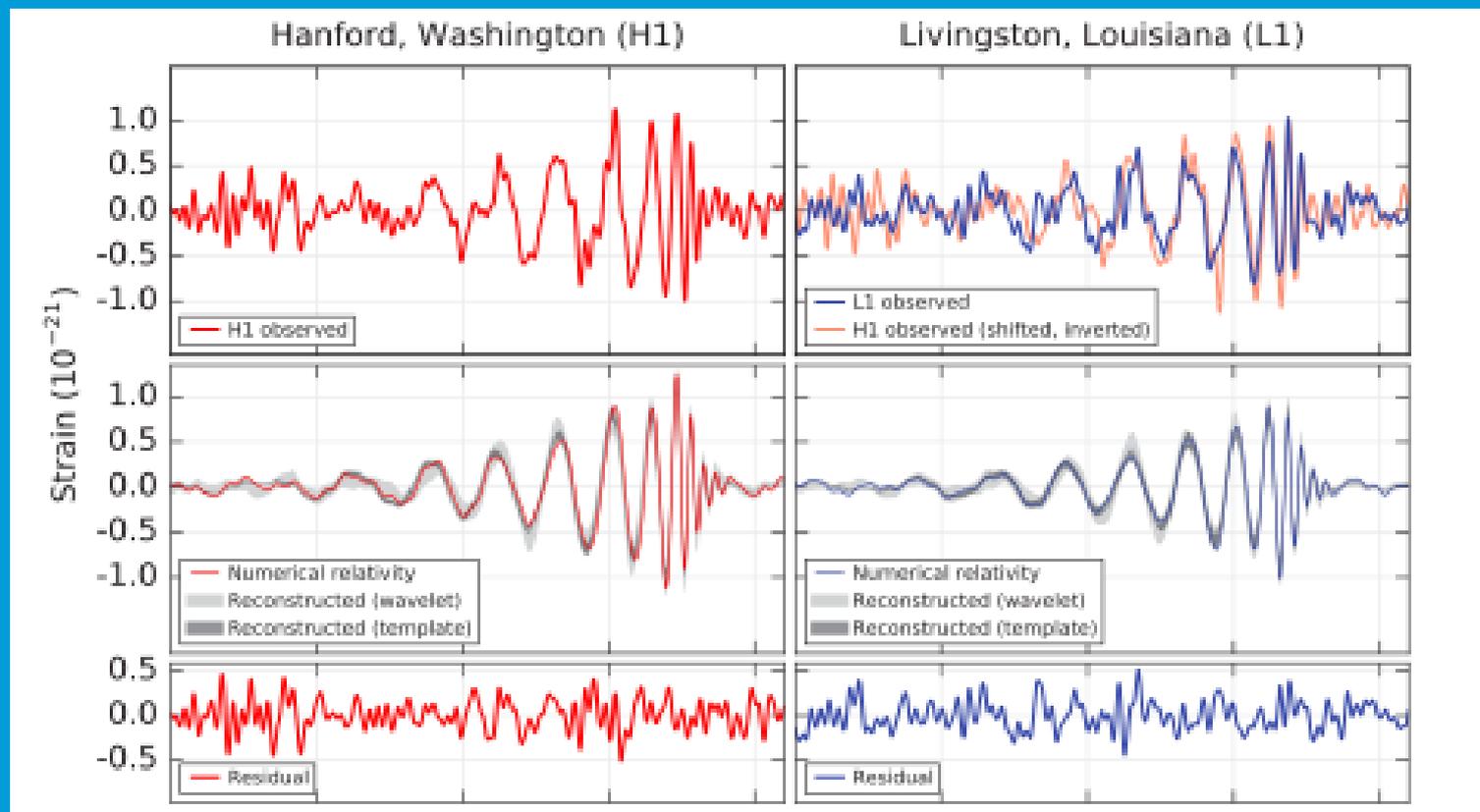
# Sensitività (2016) e posizione degli osservatori Hanford e Livingston (LIGO)



14 Settembre 2015: gli osservatori di Hanford e Livingston osservano il segnale coincidente (poi battezzato) GW150914.

Tale segnale è completamente incompatibile con il fondo, perfettamente in tempo tra Hanford e Livingston (entro i 10 ms).

Tale segnale dura in tutto 0.5 s ed è in perfetto accordo con quanto previsto per il collasso reciproco di due buchi neri.



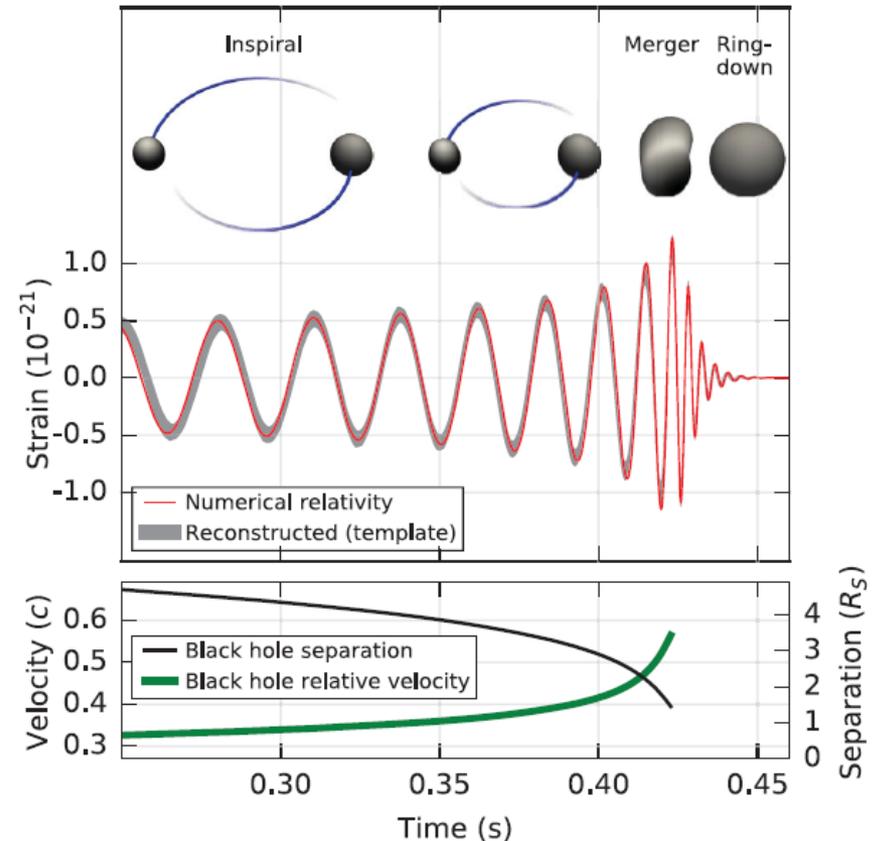
Il segnale osservato può essere generato solo dal collasso reciproco di due buchi neri di circa 36 e 29 masse solari.

Il buco nero risultato (di Kerr) ha una massa di 62 masse solari circa. Tre masse solari circa sono sparite! Trasformate in energia, vibrazione dello spaziotempo!

Physical Review Letters 116 (2016) 061102 è un articolo che entra nella storia.

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by  $(1+z)$  [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



Evidenza schiacciante del collasso BH-BH (solo una coppia di buchi neri può raggiungere una frequenza orbitale di 75 Hz senza contatto reciproco).

La potenza massima trasformata in onde gravitazionali è 1000 volte superiore alla potenza irradiata da una Supernova

$$P_{\max} \approx 4 \times 10^{56} \text{ erg / s}$$

Posizione nello spazio poco definita (600 gradi<sup>2</sup>), differenza dei tempi di arrivo

Collasso reciproco e buco nero finale entro

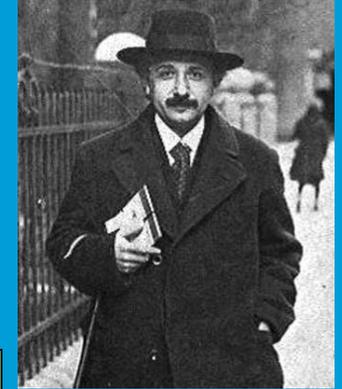
$$R_S \gg 200 \text{ km}$$



# La strada centenaria delle Onde Gravitazionali

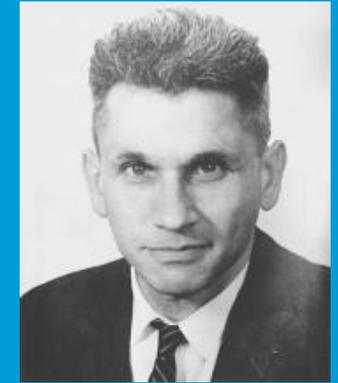
1916 Previsione di Einstein sulle Onde Gravitazionali  
(all'Accademia delle Scienze di Prussia)

Segnale previsto molto debole, tanto che Einstein stesso era scettico sulla possibilità che fossero mai rivelate



1960's Idea delle barre risonanti criogeniche. Antenne di "Gravity Joe" Joseph Weber.

Edoardo Amaldi e la costruzione delle antenne risonanti europee Auriga (Pd), Nautilus (Frascati), Explorer (CERN)



1990 Costruzione degli Interferometri ad alta sensibilità LIGO (Weiss, Drever, Thorne) e Virgo (Giazotto, Brillet)

2016: 1000 scienziati da varie parti del mondo (USA, Italia, Francia, Germania...) osservano direttamente le onde gravitazionali



# Scoperta di altre sorgenti di Onde Gravitazionali? Si!

PRL 116, 241103 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
17 JUNE 2016

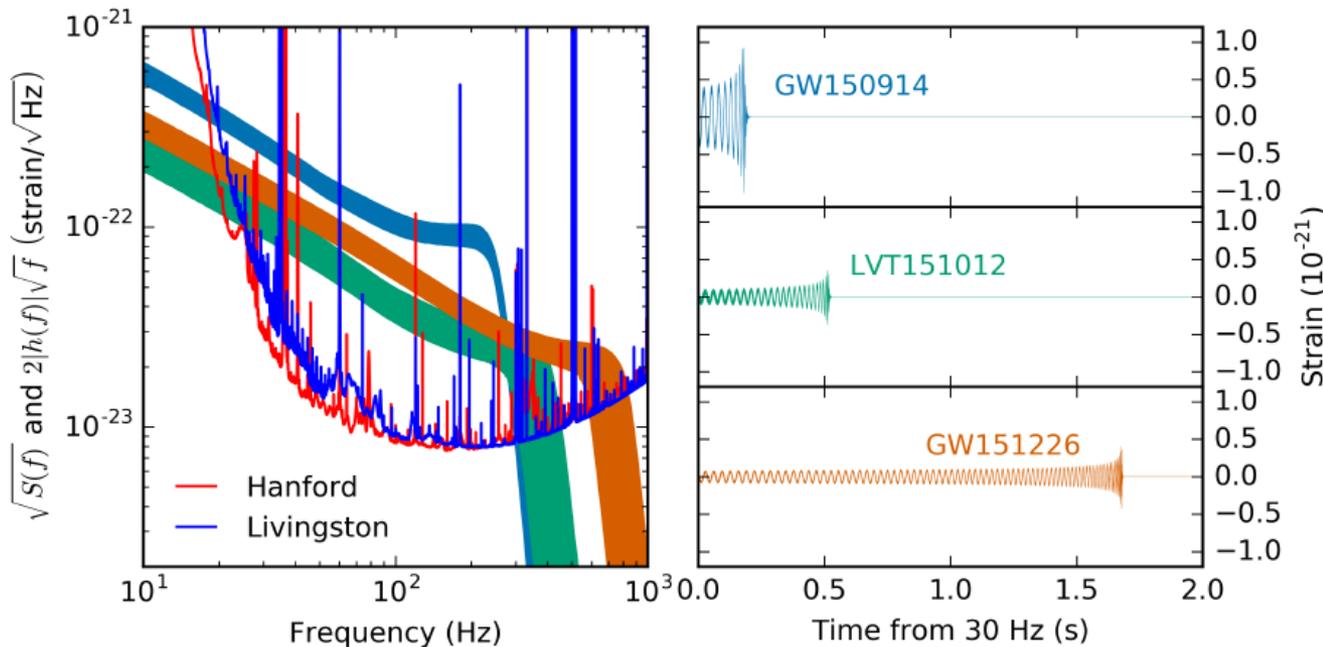


## GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 31 May 2016; published 15 June 2016)



La seconda osservazione di due Black-Holes Coalescenti!

Le coalescenze di Black Holes osservate sono certamente due. Forse tre.

14 Settembre 2015: gli osservatori di Hanford e Livingston osservano il segnale coincidente (poi battezzato) GW150914.

26 Dicembre 2016: gli osservatori di Hanford e Livingston osservano il segnale coincidente (poi battezzato) GW151226.

Vi saranno presto tante sorgenti identificate.  
Una Astronomia delle Onde Gravitazionali.

# Quasi conclusione : verso una visione unificata delle Forze Fondamentali (Campo Unificato?)

## Alcune milestones

- 1821: Esperienza di Oersted. Magnetismo non è disgiunto dal campo elettrico.
  - 1845: Esperienza di Faraday (rotazione della polarizzazione ottica in campi magnetici). L'ottica non è disgiunta dall'elettromagnetismo.
  - 1861: Equazioni di Maxwell per il campo Elettromagnetico.
  - 1886: Hertz rivela le onde elettromagnetiche (campi elettrici oscillanti).
  - 1915: Einstein propone la Relatività Generale
  - 1916: Schwarzschild trova la prima soluzione delle Eq. di Einstein. Einstein prevede l'esistenza di onde gravitazionali.
  - 1934: Teoria di Fermi sulle Interazioni Nucleari Deboli.
  - 1956: Elettrodinamica Quantistica (Feynman, Tomonaga, Schwinger)
  - 1973: Unificazione Elettrodebole (Glashow, Salam, Weinberg)
  - 1973: Evidenza indiretta di onde gravitazionali (Hulse, Taylor)
  - 1975: Teoria delle Interazioni Forti (QCD asymptotic freedom, Wilczek, Gross, Politzer)
  - 1984: Scoperta dei Bosoni Vettori Intermedi W,Z.
  - 2012: Scoperta del Bosone di Higgs.
  - 2016: Scoperta delle Onde Gravitazionali
- 
- Unificazione (GUT) delle Interazioni Forti con la Teoria Elettrodebole ? (ipotesi)
  - Struttura quantistica della Gravità ? (ipotesi)



Grazie per l'attenzione

## VIII. CONCLUSION

The LIGO detectors have observed gravitational waves from the merger of two stellar-mass black holes. The detected waveform matches the predictions of general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

- I rivelatori di LIGO hanno osservato onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di masse stellari.
- La forma d'onda rivelata è in accordo con le predizioni della relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri e l'assestamento del buco nero risultante.
- Queste osservazioni dimostrano l'esistenza di sistemi binari di buchi neri con masse stellari.
- Questa è la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione di un sistema binario di buchi neri coalescenti.
- Questa osservazione è stata confermata da un'altra osservazione simile, avvenuta pochi mesi dopo.



## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

- I rivelatori di LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) hanno osservato onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di masse stellari.
- La forma d'onda rivelata è in accordo con le predizioni della relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri e l'assestamento del buco nero risultante.
- Questa osservazione dimostra l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di masse stellari.
- Questa è la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione di un sistema binario di buchi neri coalescenti.



11 Febbraio Press Conference

