

L'Astronomia Nova delle onde gravitazionali

Sebastiano Sonego*

Dipartimento di Scienze Matematiche, Informatiche e Fisiche



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

AFAM, Remanzacco, 1 dicembre 2017

* sebastiano.sonego@uniud.it

1609 — oltre 400 anni fa...



Una svolta epocale nella storia della scienza...





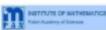
Thursday, February 11, 16:30

PRESS CONFERENCE LIGO and VIRGO Collaborations

*Scientists to provide an update
on the search for gravitational waves*



VIRGO  **EGO** EUROPEAN
GRAVITATIONAL
OBSERVATORY



**Auditorium
European Gravitational Observatory (EGO)
Cascina (Italy)**



Barry C. Barish (Caltech)



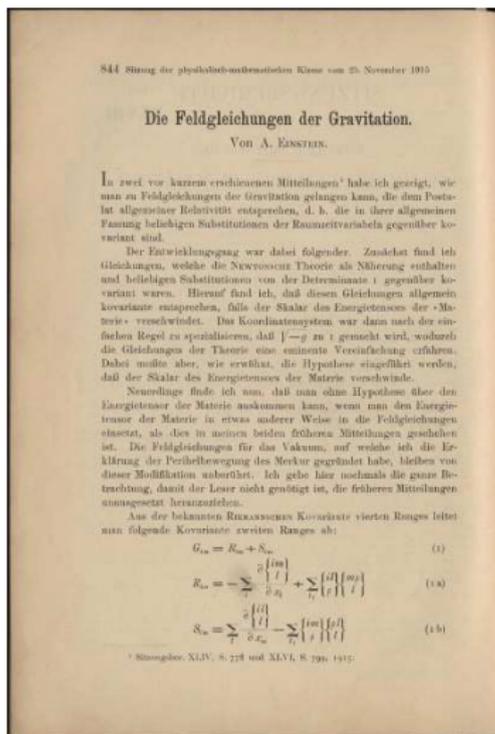
Kip S. Thorne (Caltech)



Rainer Weiss (MIT)



2017 Nobel Prize in Physics



25 novembre 1915: Accademia Prussiana delle Scienze

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

Von A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter „erster Näherung“ ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen $\gamma_{\mu\nu}$, welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen δ als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$.

Wir werden zeigen, daß diese $\gamma_{\mu\nu}$ in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik. Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen. Es hat sich gezeigt, daß die von mir vorgeschlagene Wahl des Bezugssystems gemäß der Bedingung $y = \int g_{\mu\nu} dx^\nu = -1$ für die Berechnung der Fehler in erster Näherung nicht vorteilhaft ist. Ich wurde hierauf aufmerksam durch eine briefliche Mitteilung des Astronomen Dr. STRÖM, der fand, daß man durch eine andere Wahl des Bezugssystems zu einem einfacheren Ausdruck des Gravitationsfeldes eines ruhenden Massenpunktes gelangen kann, als ich ihm früher gegeben hatte¹. Ich stütze mich daher im folgenden auf die allgemeinen invariante Feldgleichungen.

¹ Strömgenen. XLVII, 110 S. 8, 9, 11.

$$\sum_{\nu} \frac{\partial^2}{\partial x_\nu^2} \left(\gamma_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\nu} \gamma_{\nu\nu} \right) = 2\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum_{\nu} T_{\nu\nu} \right)$$

oder

$$\sum_{\nu} \frac{\partial^2}{\partial x_\nu^2} \gamma_{\mu\nu} = 2\kappa T_{\mu\nu} \quad (6)$$

Es ist hierzu zu bemerken, daß Gleichung (6) mit der Gleichung (4) im Einklang ist. Denn es ist zunächst leicht zu zeigen, daß bei der von uns erstrebten Genauigkeit der Impulsergiesatz für die Materie durch die Gleichung

$$\sum_{\nu} \frac{\partial T_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = 0 \quad (7)$$

ausgedrückt wird. Führt man in (6) die Operation $\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x_\nu}$ aus, so verschwindet nicht nur vermöge (4) die linke Seite, sondern, wie es sein muß, vermöge (7) auch die rechte Seite von (6). Wir merken an, daß wegen (3) und (5) die Gleichungen

$$\gamma_{\nu\nu} = \gamma_{\nu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\nu\nu} \sum_{\nu} \gamma_{\nu\nu} \quad (8)$$

$$\gamma'_{\nu\nu} = \gamma_{\nu\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\nu\nu} \sum_{\nu} \gamma_{\nu\nu} \quad (9)$$

bestehen. Da sich die $\gamma'_{\nu\nu}$ nach Art der retardierten Potentiale berechnen lassen, so ist damit unsere Aufgabe gelöst. Es ist

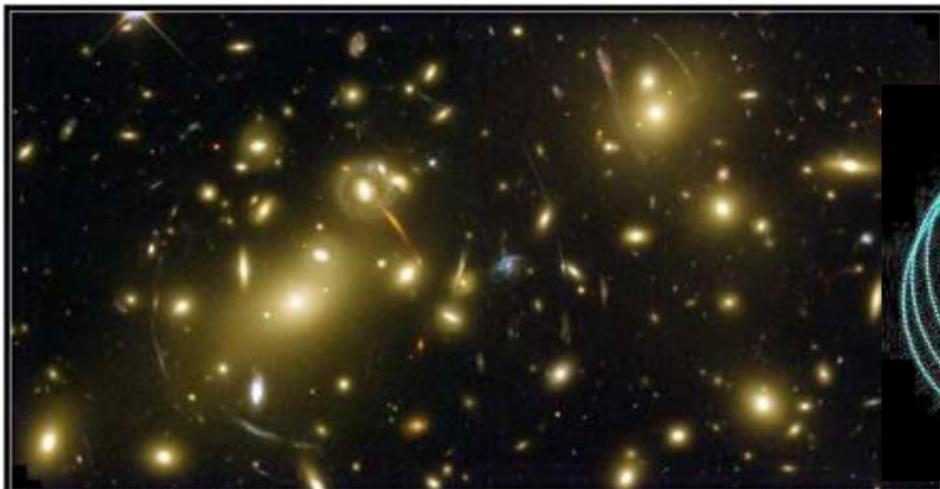
$$\gamma'_{\mu\nu} = -\frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu}(x_\nu, y_\nu, z_\nu, t-r)}{r} dV_\nu \quad (9)$$

Dabei sind mit x, y, z, t die reellen Koordinaten $x_\nu, x_\nu, x_\nu, \frac{x_\nu}{i}$ bezeichnet, und zwar bezeichnen sie ohne Index die Koordinaten des Aufpunktes, mit dem Index ν diejenigen des Integrationselementes. dV_ν ist das dreidimensionale Volumenelement des Integrationsraumes ν , der räumliche Abstand $V(x-x_\nu)^2 + (y-y_\nu)^2 + (z-z_\nu)^2$.

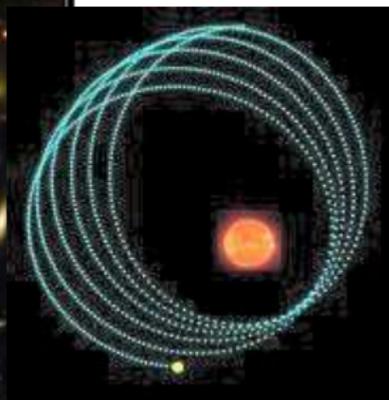
Für das Folgende bedürfen wir ferner der Energiekomponenten des Gravitationsfeldes. Wir erhalten sie am einfachsten direkt aus den Gleichungen (6). Durch Multiplikation mit $\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\nu^2}$ und Summation über μ und ν erhält man auf der linken Seite nach geübter Umformung

$$\frac{\partial}{\partial x_\nu} \left[\sum_{\mu} \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} - \frac{\partial \gamma_{\nu\nu}}{\partial x_\nu} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_\nu} \left(\sum_{\mu} \frac{\partial \gamma_{\mu\mu}}{\partial x_\nu} \right) \right]$$

Non è l'unica previsione notevole di quel periodo...



Galaxy Cluster Abell 2218



HST • WFC3



(, STECF) • ST



Che cos'è la relatività generale?

- È la migliore teoria della gravitazione che possediamo.
- È una teoria della struttura geometrica dello spaziotempo.

Su scale molto piccole (“infinitesime”) lo spaziotempo è piatto. Ma su scale finite, in presenza di gravitazione esso possiede una curvatura.

Più precisamente, la gravitazione è una manifestazione della curvatura dello spaziotempo.

Che cos'è la relatività generale?

- È la migliore teoria della gravitazione che possediamo.
- È una teoria della struttura geometrica dello spaziotempo.

Su scale molto piccole (“infinitesime”) lo spaziotempo è piatto. Ma su scale finite, in presenza di gravitazione esso possiede una curvatura.

Più precisamente, la gravitazione è una manifestazione della curvatura dello spaziotempo.

Analogia in 2D

Su scale finite, le distanze non si combinano necessariamente secondo la geometria euclidea. Questo comportamento viene attribuito alla **curvatura** dello spazio.



Un campo gravitazionale è assimilabile a una curvatura (dello spaziotempo).

Allo stesso modo in cui la materia genera gravitazione, essa influenza la geometria (dello spaziotempo).

Si tratta di deviazioni minuscole: sulla superficie terrestre, sono dell'ordine di 10^{-10} .

- La geometria diventa parte della fisica.
- La gravitazione viene geometrizzata.

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

Un campo gravitazionale è assimilabile a una curvatura (dello spaziotempo).

Allo stesso modo in cui la materia genera gravitazione, essa influenza la geometria (dello spaziotempo).

Si tratta di deviazioni minuscole: sulla superficie terrestre, sono dell'ordine di 10^{-10} .

- La geometria diventa parte della fisica.
- La gravitazione viene geometrizzata.

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

Onde gravitazionali

- Nella teoria newtoniana, la gravitazione agisce “a distanza” — istantaneamente.
- Nella teoria della relatività generale, l'azione gravitazionale si trasmette alla velocità della luce, $c \approx 3 \times 10^8$ m/s.

Questo è sufficiente per affermare che devono esistere **onde gravitazionali**.

(Einstein, 1916;
Poincaré, 1906)



Onde gravitazionali

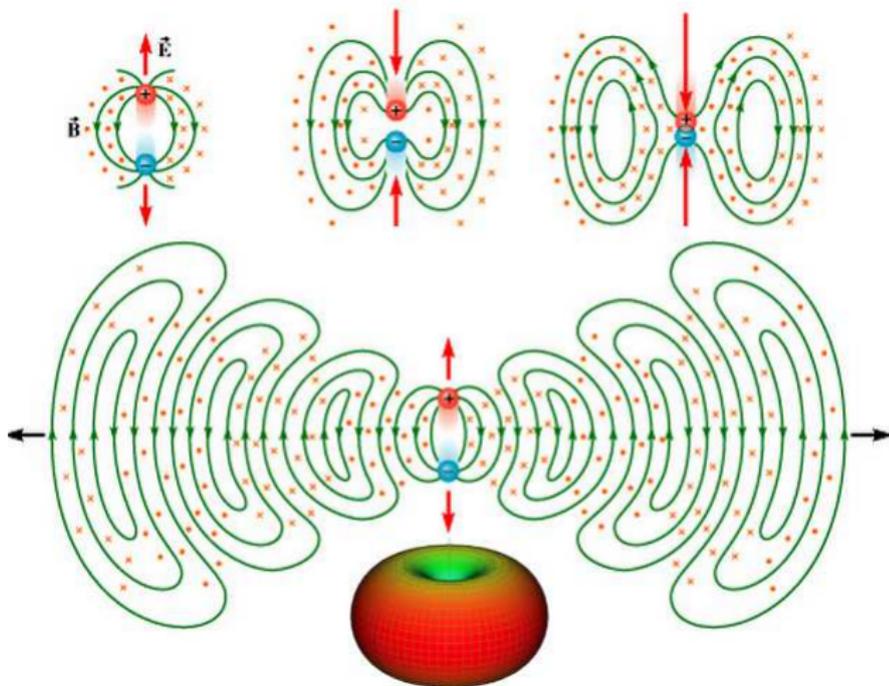
- Nella teoria newtoniana, la gravitazione agisce “a distanza” — istantaneamente.
- Nella teoria della relatività generale, l'azione gravitazionale si trasmette alla velocità della luce, $c \approx 3 \times 10^8$ m/s.

Questo è sufficiente per affermare che devono esistere **onde gravitazionali**.

(Einstein, 1916;
Poincaré, 1906)



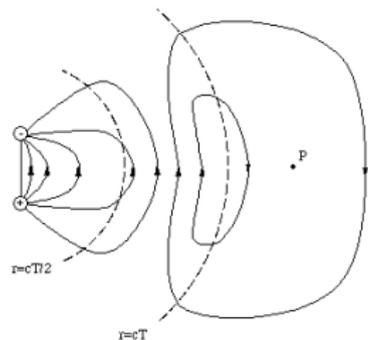
... ma la natura delle onde gravitazionali è decisamente più complessa di quella, ad esempio, delle onde elettromagnetiche.



Electromagnetic Radiation from Oscillating Dipole

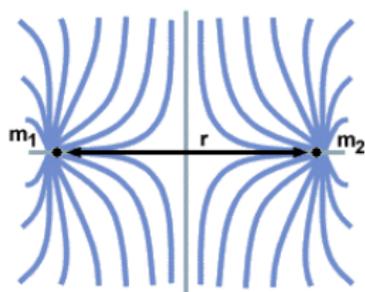
Generazione di onde gravitazionali. 1

Non c'è radiazione da "dipolo gravitazionale":



$$\text{Potenza} \propto \ddot{\mathbf{d}}^2$$

$$\mathbf{d} = \sum_n q_n \mathbf{x}_n$$



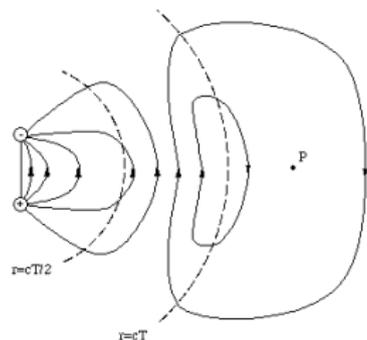
$$\mathbf{d} = \sum_n m_n \mathbf{x}_n$$

$$\dot{\mathbf{d}} = \mathbf{p}$$

$$\ddot{\mathbf{d}} = 0$$

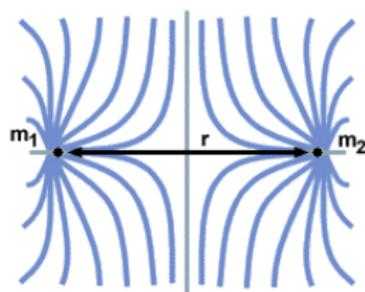
Generazione di onde gravitazionali. 1

Non c'è radiazione da “dipolo gravitazionale”:



$$\text{Potenza} \propto \ddot{\mathbf{d}}^2$$

$$\mathbf{d} = \sum_n q_n \mathbf{x}_n$$

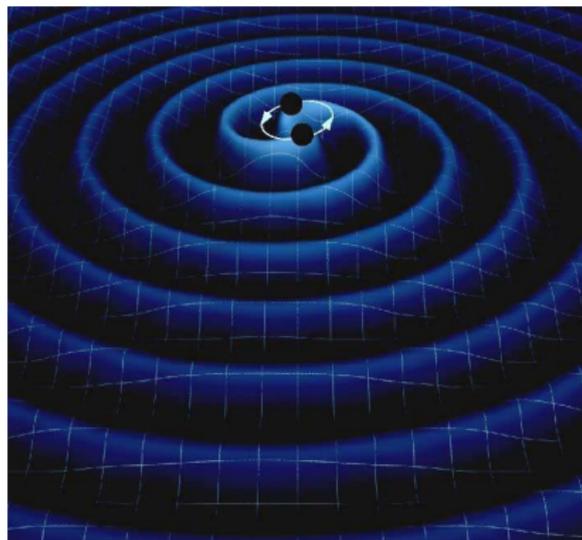


$$\mathbf{d} = \sum_n m_n \mathbf{x}_n$$

$$\dot{\mathbf{d}} = \mathbf{p}$$

$$\ddot{\mathbf{d}} = \mathbf{0}$$

Generazione di onde gravitazionali. 2



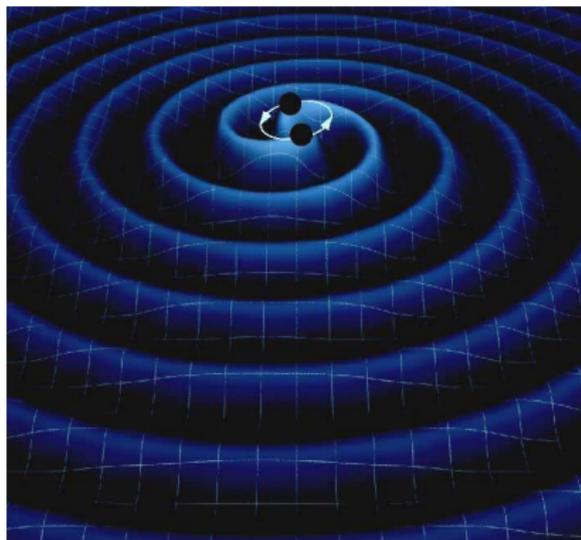
$$\text{Potenza} \sim \frac{GM^2}{R} \left(\frac{v}{c}\right)^5 \frac{1}{T}$$

$$v \sim \frac{R}{T} \quad \frac{R^3}{T^2} \sim GM$$

Esempio: Sistema Terra–Sole; $v/c \sim 10^{-4}$, $T \sim 1$ anno. In 10^{10} anni, si perde 10^{-10} volte l'energia di legame gravitazionale \Rightarrow l'orbita decresce di una parte su 10^{10} , cioè di $\sim 10^{-10} \times 10^{11} = 10$ metri!

- Affinché vi siano effetti osservabili, serve un sistema molto più compatto!

Generazione di onde gravitazionali. 2



$$\text{Potenza} \sim \frac{GM^2}{R} \left(\frac{v}{c}\right)^5 \frac{1}{T}$$

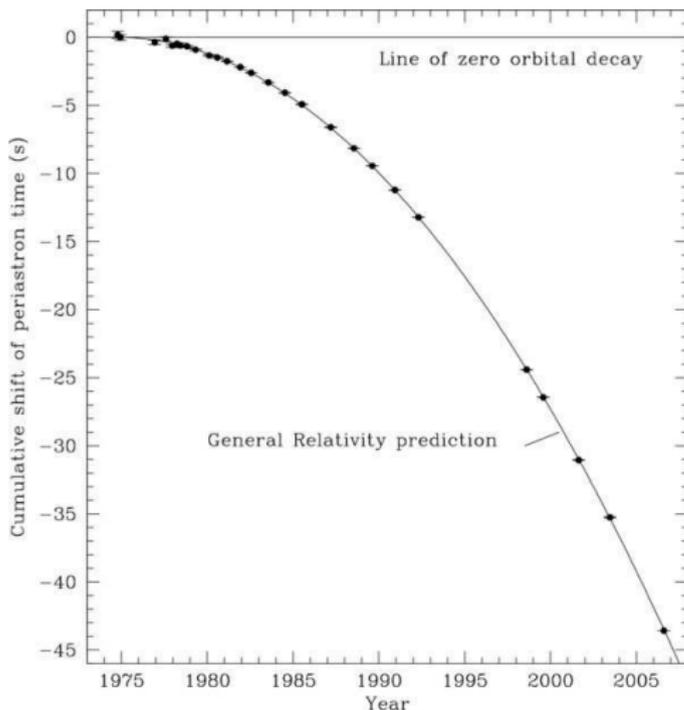
$$v \sim \frac{R}{T} \quad \frac{R^3}{T^2} \sim GM$$

Esempio: Sistema Terra–Sole; $v/c \sim 10^{-4}$, $T \sim 1$ anno. In 10^{10} anni, si perde 10^{-10} volte l'energia di legame gravitazionale \Rightarrow l'orbita decresce di una parte su 10^{10} , cioè di $\sim 10^{-10} \times 10^{11} = 10$ metri!

- Affinché vi siano effetti osservabili, serve un sistema molto più compatto!

Pulsar binaria (Hulse & Taylor 1974; Nobel 1993)

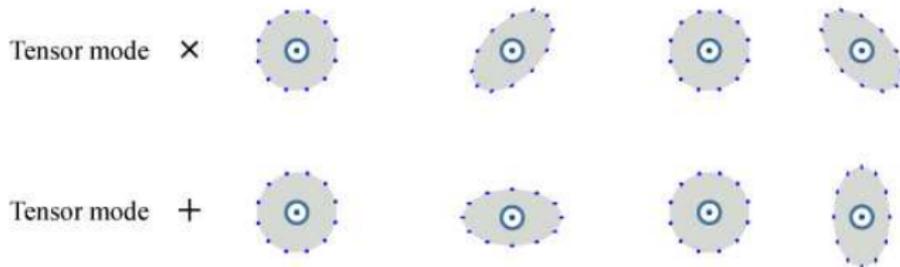
PSR B1913 + 16: $M \sim 1 M_{\odot}$; $T \sim 7$ ore; $R \sim 10^9 m$.



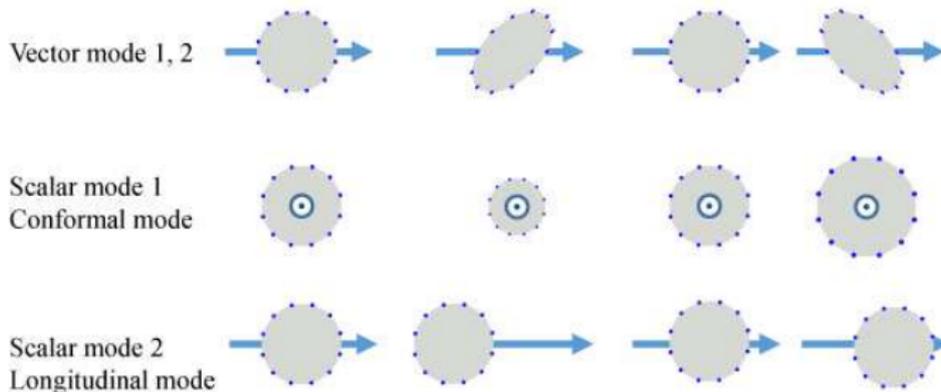
(Weisberg, Nice & Taylor, 2010)

⇒ Le onde gravitazionali non sono oscillazioni della forza gravitazionale, bensì oscillazioni della **geometria dello spazio**.

Polarizations present in GR: Fully transverse to the line of propagation



Additional Polarizations not present in GR



Misura diretta

Rilevare direttamente queste “increspature” nella geometria si è dimostrato estremamente difficile...



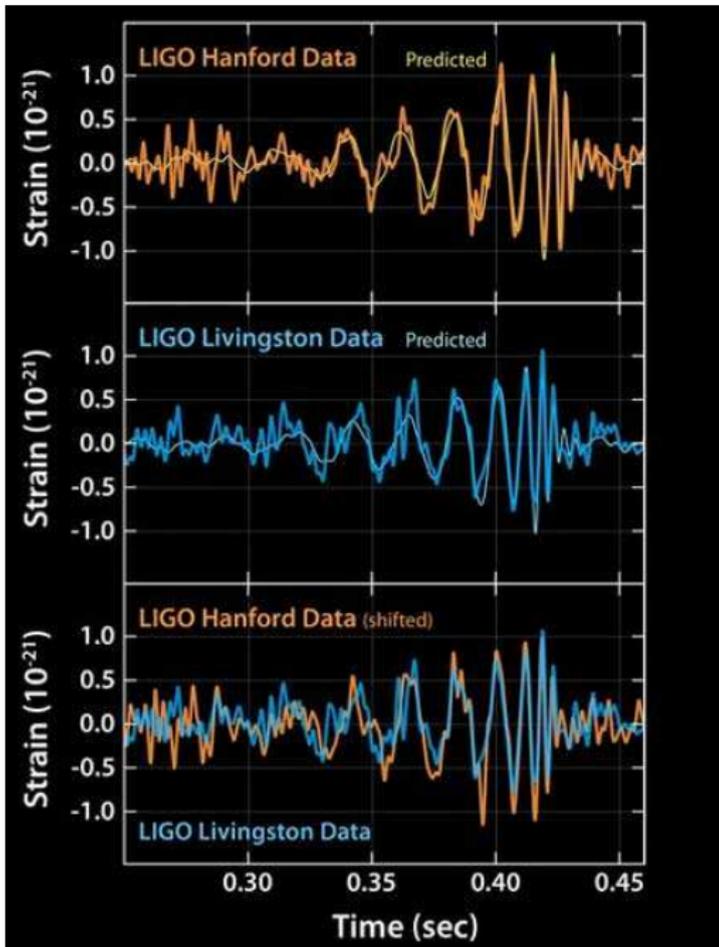
LIGO (Hanford, WA):
4 km × 4 km



VIRGO (Pisa): 3 km × 3 km

Interferometria: si rilevano onde (gravitazionali) per mezzo di onde (elettromagnetiche).

... ma il 14 settembre 2015 lo sforzo è stato premiato!



Fusione di due buchi neri.[†]

- Dove: in direzione delle Nubi di Magellano, a 1.3 ± 0.6 miliardi di anni luce da noi
- Masse: 36 e $29 M_{\odot}$
- Massa finale: $62 M_{\odot}$
- Energia totale irraggiata sotto forma di onde gravitazionali: $3 M_{\odot} c^2$
- Picco di luminosità: $200 M_{\odot} c^2/s$

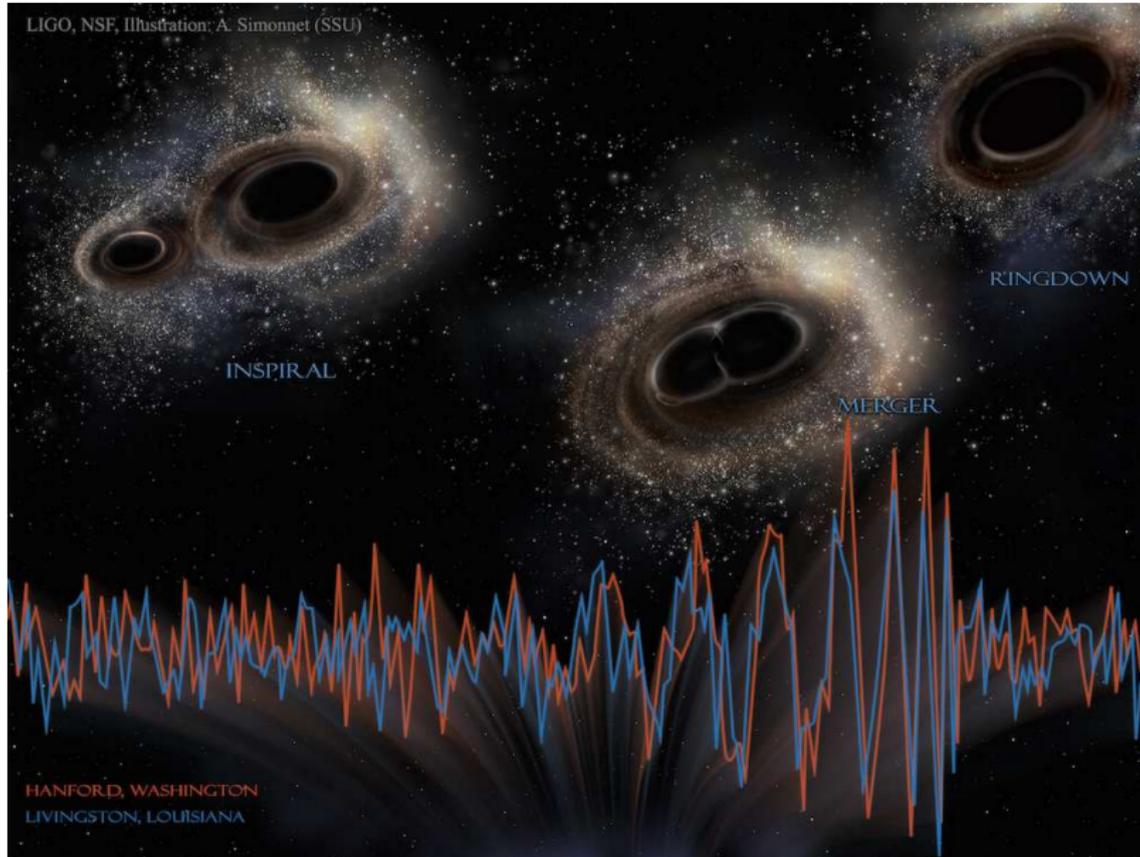
[†]Mai osservata in precedenza!

Fusione di due buchi neri.[†]

- Dove: in direzione delle Nubi di Magellano, a 1.3 ± 0.6 miliardi di anni luce da noi
- Masse: 36 e $29 M_{\odot}$
- Massa finale: $62 M_{\odot}$
- Energia totale irraggiata sotto forma di onde gravitazionali: $3 M_{\odot} c^2$
- Picco di luminosità: $200 M_{\odot} c^2/s$

[†]Mai osservata in precedenza!

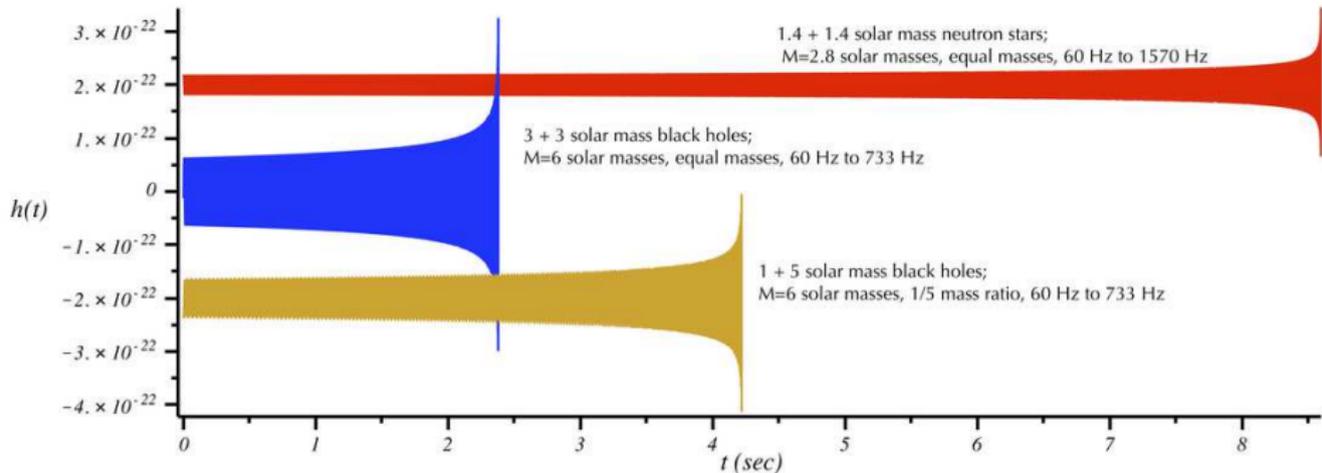
LIGO, NSF, Illustration: A. Simonnet (SSU)

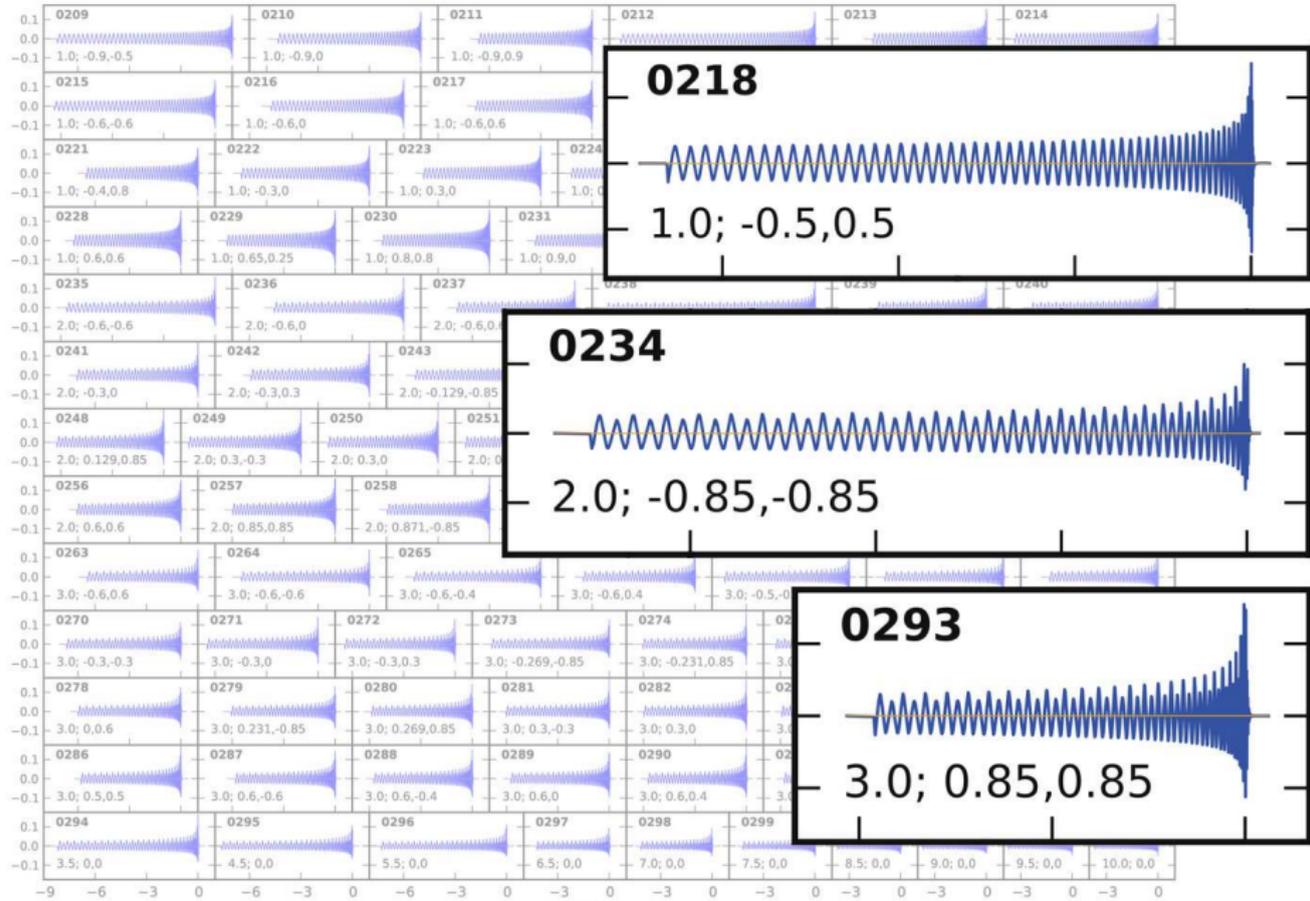


La prima verifica della relatività generale in condizioni di campo gravitazionale intenso.

Un nuovo tipo di astronomia!

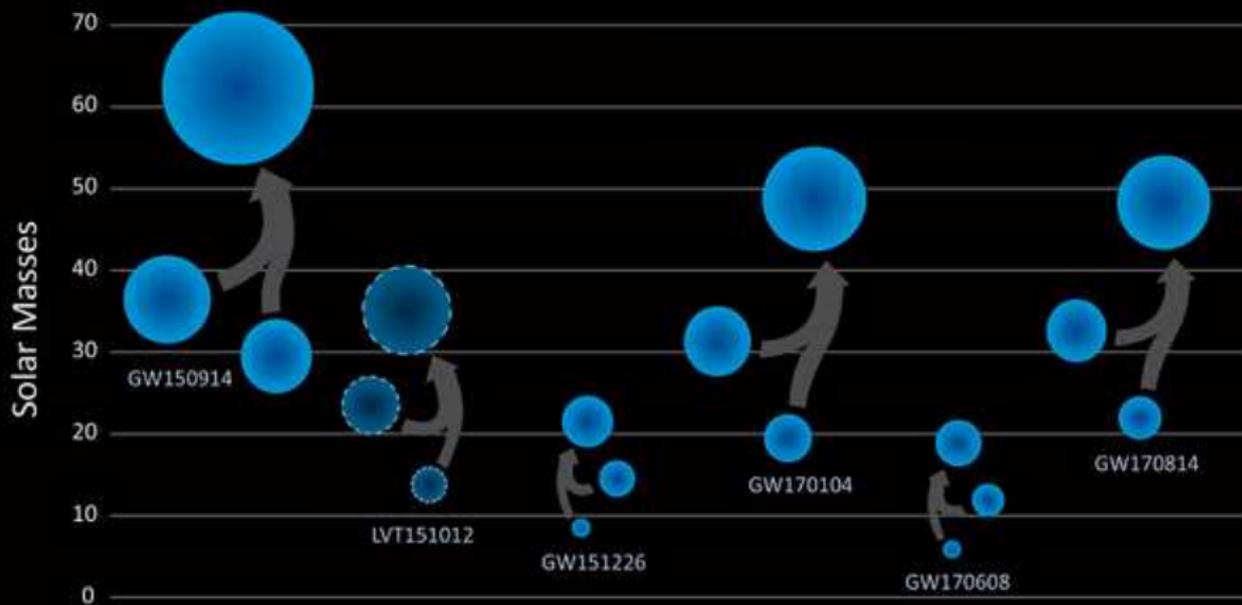
Identificare la sorgente





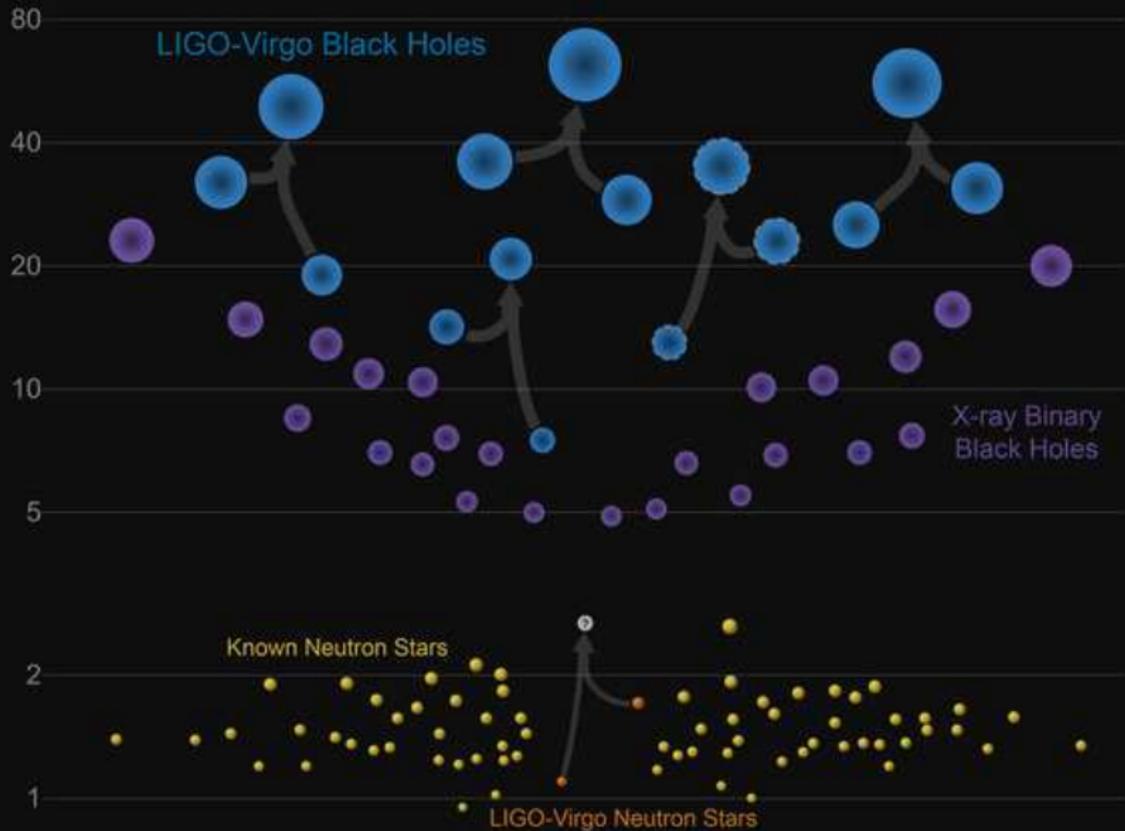
Tony Chu *et al.*, *Classical and Quantum Gravity* **33**, 165001 (2016)

Black Holes of Known Mass

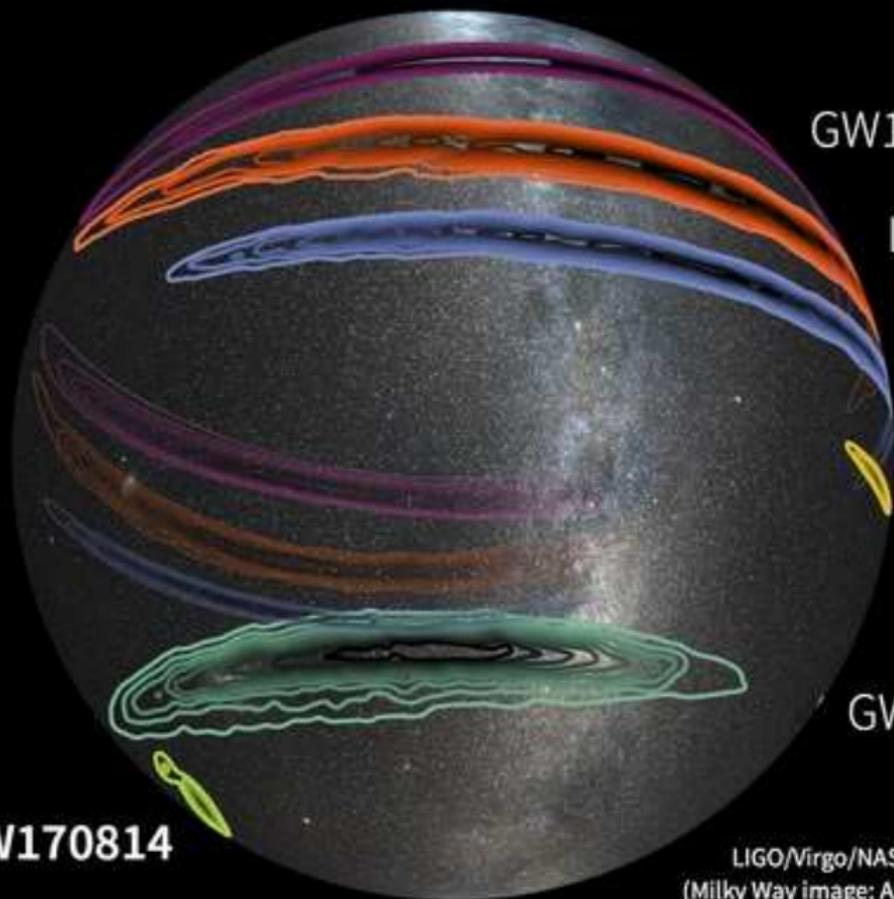


Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



GW170814



GW170104

LVT151012

GW151226

GW170817

GW150914

LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer
(Milky Way image: Axel Mellinger)

17 agosto 2017: una data memorabile

Fermi

Reported 16 seconds
after detection



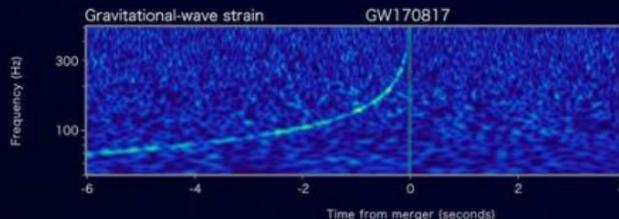
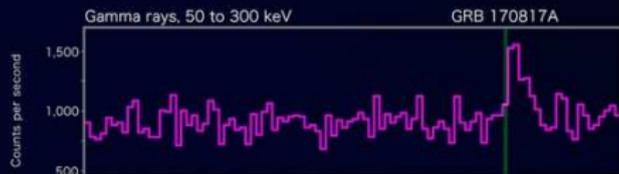
LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



INTEGRAL

Reported 66 minutes
after detection

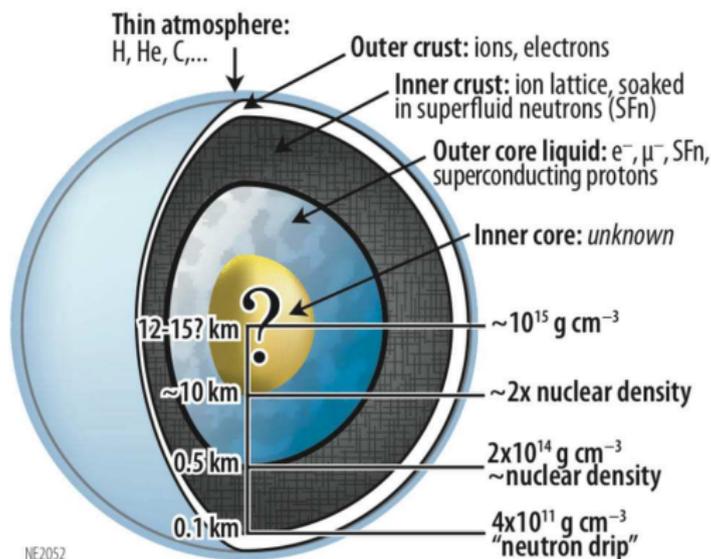


11 ore dopo, i telescopi iniziano a osservare una kilonova in NGC 4993 (a 130 milioni di anni luce da noi).

9 giorni dopo si osservano i raggi X provenienti dallo stesso punto.

Che cosa è stato visto?

Fusione di due stelle di neutroni.



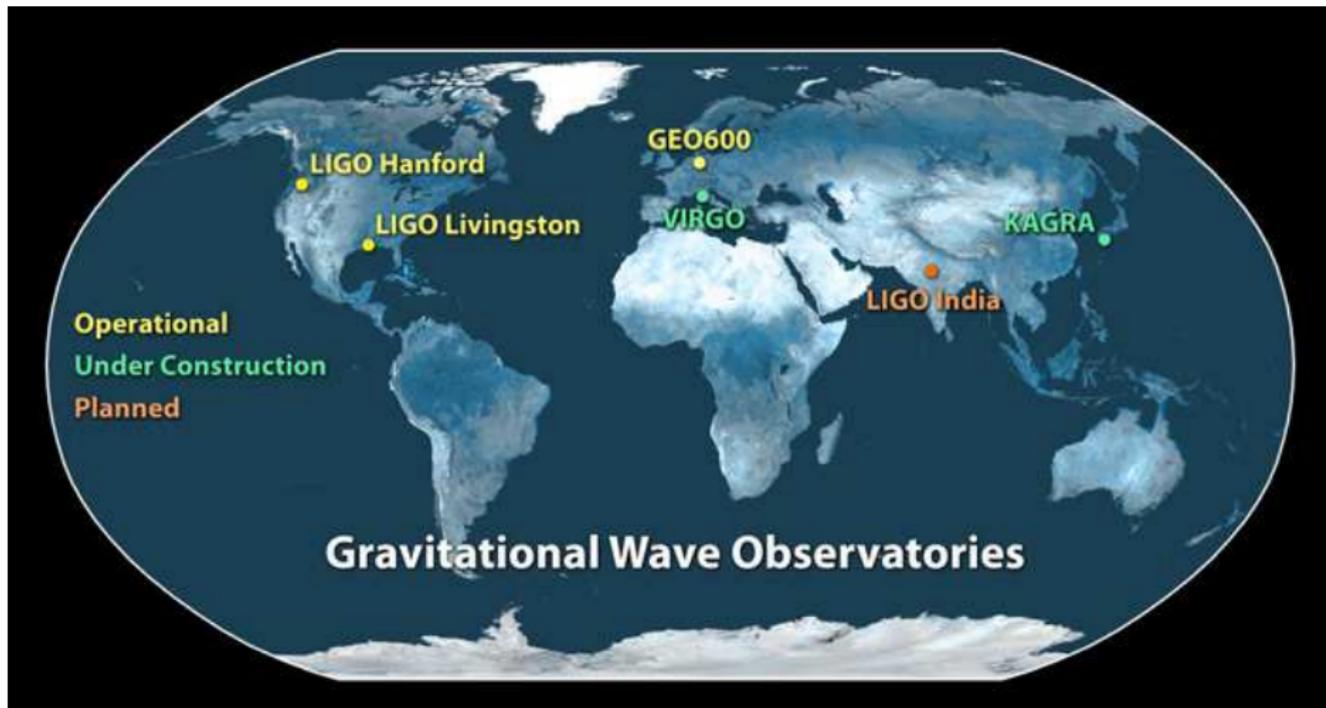
- Massa complessiva: circa $3 M_{\odot}$
- Energia totale irradiata sotto forma di onde gravitazionali: $0.025 M_{\odot} c^2$
- Ha formato la più grossa stella di neutroni nota oppure il più piccolo buco nero...

Molti risultati in un colpo solo!

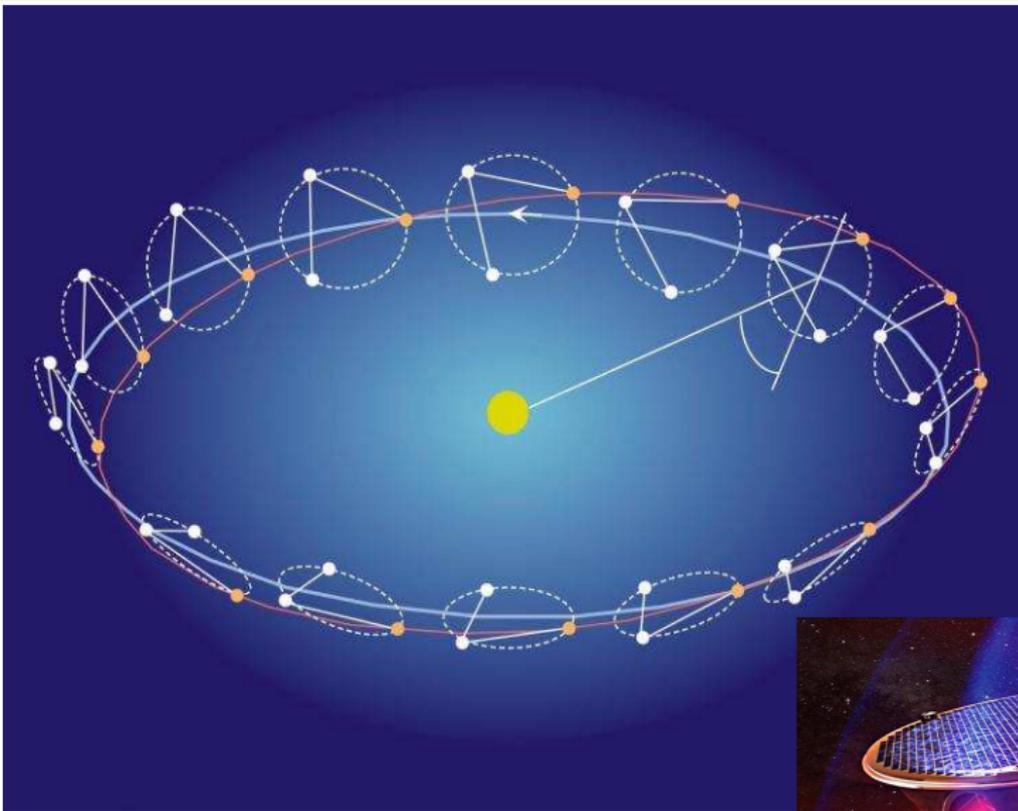
È solo il primo esempio di *astronomia multimessenger*, ma ci dice molte cose:

- $\frac{|C_{\text{em}} - C_{\text{grav}}|}{C_{\text{em}}} \lesssim 10^{-15} \Rightarrow \text{Ok RG; no molte teorie rivali.}$
- I GRB brevi hanno origine dalla fusione di stelle di neutroni.
- La fusione di stelle di neutroni è la fonte principale di elementi pesanti ($16 M_{\oplus}$, di cui $10 M_{\oplus}$ di Au e Pt).
- Sirene standard \Rightarrow nuova misura della costante di Hubble.
- Informazioni sullo stato della materia nelle stelle di neutroni.

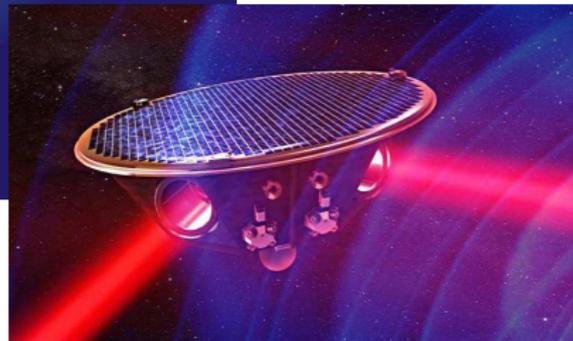
Il futuro: un network planetario



Il futuro: eLISA — buchi neri supermassicci



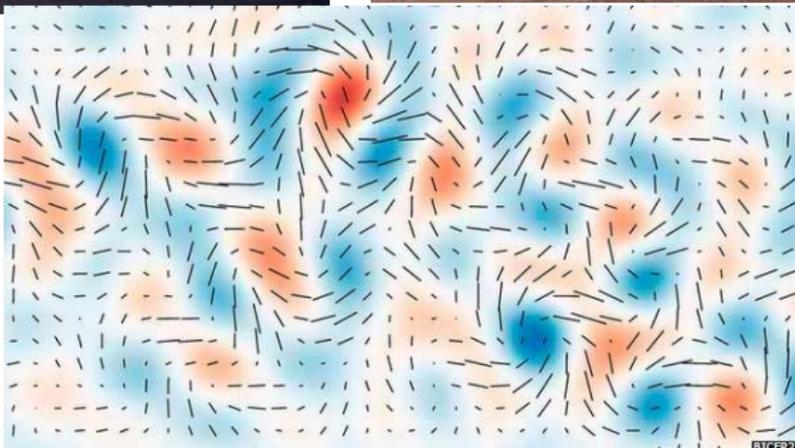
5×10^6 km!



Il futuro: modi B — le origini dell'universo



BICEP2
POLARBEAR



Da fare/capire:

- **Costruire i rivelatori, migliorare la sensibilità, etc.**
- Simulazioni. (Relatività numerica — complicatissima!)
- Teorie alternative della gravitazione?
- Sorgenti alternative?[‡] (Gravastars, wormholes,[§] stelle nere,[¶] ...)

[‡]V. Cardoso, E. Franzin, A. Maselli, P. Pani, G. Raposo, Phys. Rev. D **95**, 084014 (2017)

[§]V. Cardoso, E. Franzin, P. Pani: Phys. Rev. Lett. **116**, 17110 (2016)

[¶]C. Barceló, S. Liberati, S. S., M. Visser: Phys. Rev. D **77**, 044032 (2008);
Le Scienze, nov. 2009

- Costruire i rivelatori, migliorare la sensibilità, etc.
- Simulazioni. (Relatività numerica — complicatissima!)
- Teorie alternative della gravitazione?
- Sorgenti alternative?[‡] (Gravastars, wormholes,[§] stelle nere,[¶] ...)

[‡]V. Cardoso, E. Franzin, A. Maselli, P. Pani, G. Raposo, Phys. Rev. D **95**, 084014 (2017)

[§]V. Cardoso, E. Franzin, P. Pani: Phys. Rev. Lett. **116**, 17110 (2016)

[¶]C. Barceló, S. Liberati, S. S., M. Visser: Phys. Rev. D **77**, 044032 (2008);
Le Scienze, nov. 2009

Da fare/capire:

- Costruire i rivelatori, migliorare la sensibilità, etc.
- Simulazioni. (Relatività numerica — complicatissima!)
- Teorie alternative della gravitazione?
- Sorgenti alternative?[‡] (Gravastars, wormholes,[§] stelle nere,[¶] ...)

[‡]V. Cardoso, E. Franzin, A. Maselli, P. Pani, G. Raposo, Phys. Rev. D **95**, 084014 (2017)

[§]V. Cardoso, E. Franzin, P. Pani: Phys. Rev. Lett. **116**, 17110 (2016)

[¶]C. Barceló, S. Liberati, S. S., M. Visser: Phys. Rev. D **77**, 044032 (2008);
Le Scienze, nov. 2009

- Costruire i rivelatori, migliorare la sensibilità, etc.
- Simulazioni. (Relatività numerica — complicatissima!)
- Teorie alternative della gravitazione?
- Sorgenti alternative?[‡] (Gravastars, wormholes,[§] stelle nere,[¶] ...)

[‡]V. Cardoso, E. Franzin, A. Maselli, P. Pani, G. Raposo, Phys. Rev. D **95**, 084014 (2017)

[§]V. Cardoso, E. Franzin, P. Pani: Phys. Rev. Lett. **116**, 17110 (2016)

[¶]C. Barceló, S. Liberati, S. S., M. Visser: Phys. Rev. D **77**, 044032 (2008);
Le Scienze, nov. 2009

THE GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR WORKS! FOR THE FIRST TIME, WE CAN LISTEN IN ON THE SIGNALS CARRIED BY RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE ITSELF!



EVENT: BLACK HOLE MERGER IN CARINA (30 M_{\odot} , 30 M_{\odot})
EVENT: ZORLAX THE MIGHTY WOULD LIKE TO CONNECT ON LINKEDIN
EVENT: BLACK HOLE MERGER IN ORION (20 M_{\odot} , 50 M_{\odot})
EVENT: MORTGAGE OFFER FROM TRIANGULUM GALAXY
EVENT: ZORLAX THE MIGHTY WOULD LIKE TO CONNECT ON LINKEDIN
EVENT: MEET LONELY SINGLES IN THE LOCAL GROUP TONIGHT!

