



Seminarium PTF

Katowice 25.01.2018

Fale grawitacyjne - nowe okno na Wszechświat

Marek Biesiada
Zakład Astrofizyki i Kosmologii
Instytut Fizyki Uniwersytetu Śląskiego



Instytut Fizyki
im. Augusta Chełkowskiego



UNIwersytet Śląski
W KATOWICACH

2017 Nobel Prize in Physics

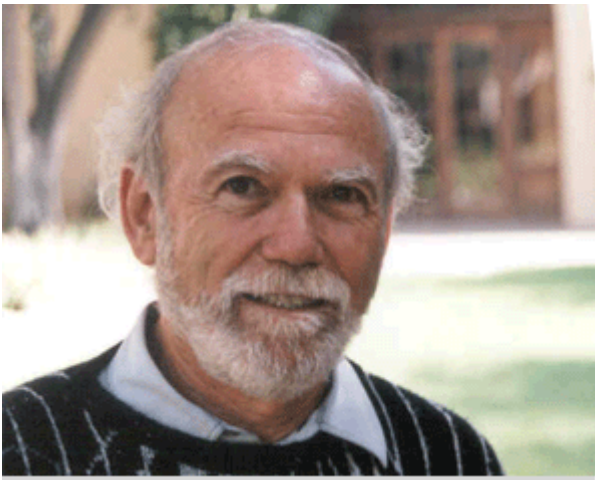
"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves".



Rainer Weiss
1/2



Kip Thorne
1/4

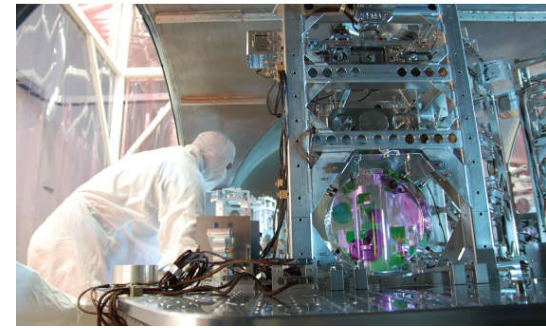


Barry Barish
1/4

Gravitational waves detected 100 years after Einstein's prediction

LIGO PRESS RELEASE

LIGO opens new window on the universe with observation of gravitational waves from colliding black holes



PRL **116**, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



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)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. 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.



Albert Einstein

1879 - 1955

Ogólna Teoria Względności (1915):

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

Rozkład materii (energii)
wyznacza
geometrię
czasoprzestrzeni

geometria

materia

10^{-43} N^{-1}

przybliżenie
słabego pola

granica Newtonowska

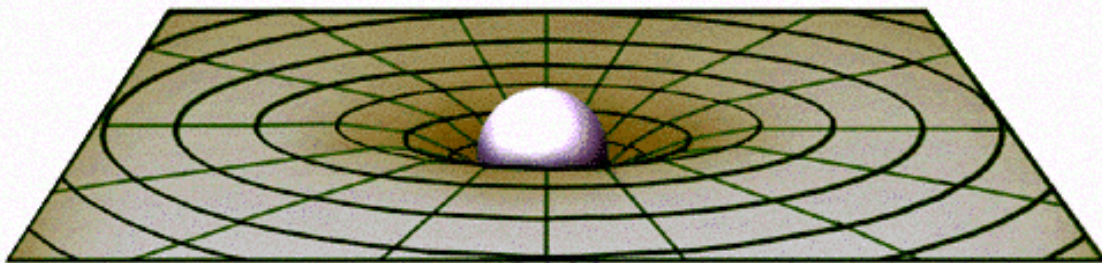
$$\varepsilon \propto \left(\frac{v}{c}\right)^2 \propto \frac{GM}{rc^2} \propto \frac{p}{\rho c^2} \ll 1$$

$$g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$\frac{\Phi}{c^2} = \begin{cases} 10^{-9} & \text{Ziemia} \\ 10^{-6} & \text{Słońce} \\ 10^{-4} & \text{WD} \\ 0.15 & \text{NS} \end{cases}$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

Newtonowska grawitacja
zawiera się w OTW jako
przypadek graniczny



Równania Einsteina

Tensor Einsteina $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ Tensor energii-pędu

Zapisane w postaci $T_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} G_{\mu\nu}$

Tensor naprężeń $\rightarrow$ $T_{\mu\nu}$

Moduł sprężystości $\rightarrow$ $\frac{c^4}{8\pi G}$

Tensor odkształceń $\rightarrow$ $G_{\mu\nu}$

Formalna analogia z prawem Hooke'a dla ośrodków sprężystych

$$\frac{c^4}{8\pi G} \approx 10^{43} N$$

Wnioski:

- Czasoprzestrzeń jest ośrodkiem sprężystym $\rightarrow$ fale grawitacyjne
- Jest ośrodkiem o bardzo dużej sprężystości
- Fale o małej amplitudzie mają dużą gęstość energii

Fale Grawitacyjne

Ogólna Teoria Względności:
równania Einsteina

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

Metryka: odległość w
czasoprzestrzeni

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

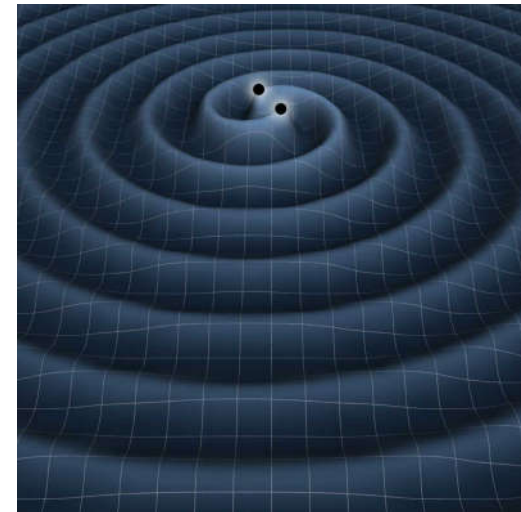
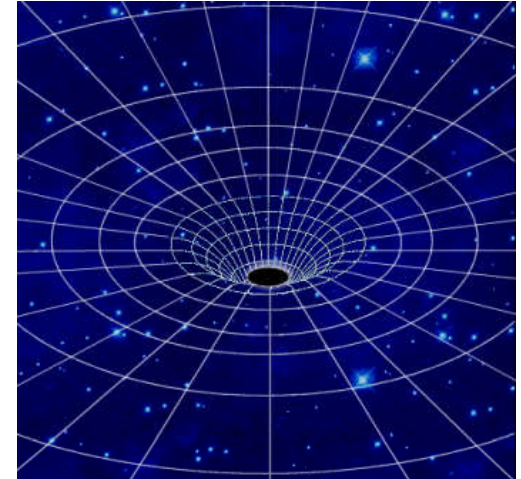
$$g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Przybliżenie słabego pola:
czasoprzestrzeń jest
zaburzoną przestrzenią
Minkowskiego

Równanie falowe dla
zaburzenia metryki $h_{\mu\nu}$

$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

w próżni



Fizyczny efekt fali grawitacyjnej

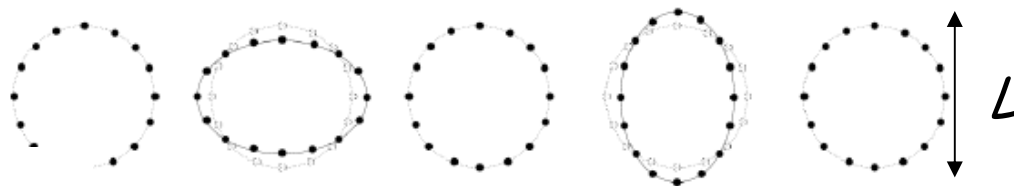
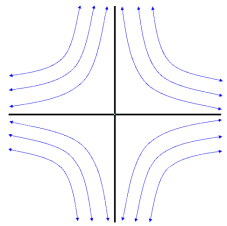
$$h(t, z) = h_{\mu\nu} e^{i(\omega t - kz)} = h_+(t - z/c) + h_\times(t - z/c)$$

Fale:

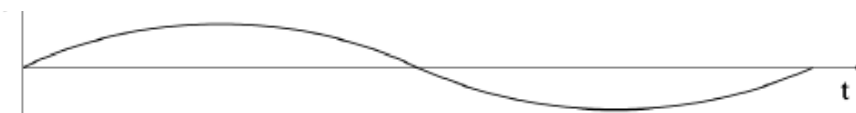
- przestrzenne
- poprzeczne
- rozchodzące się z prędkością c

Polaryzacja +

h_+



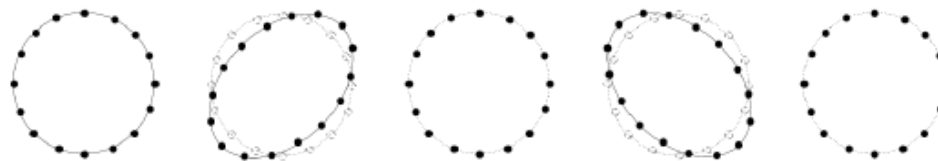
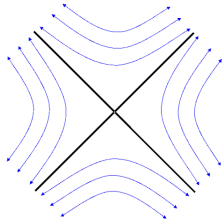
$h(t)$



$$h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} t & x & y & z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} e^{i(\omega t - kz)}$$

Polaryzacja x

$h_\times$



$$h = \Delta L / L$$

Natężenie fali -
względna amplituda
odkształcenia

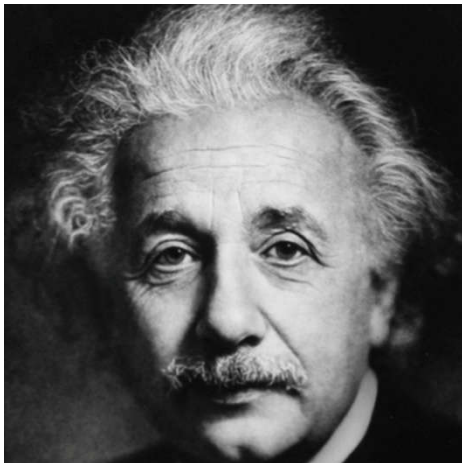
Realność fal grawitacyjnych ...

W 1936 Albert Einstein i Nathan Rosen wysłali do Phys.Rev. artykuł „Do gravitational waves exist?” kwestionujący istnienie fal grawitacyjnych.

Recenzent – Howard Percy Robertson – 10 stron recenzji wykazującej błędy w rozumowaniu

Odpowiedź Einsteina

"We (Mr. Rosen and I) had sent you our manuscript for publication and had not authorized you to show it to specialists before it is printed. I see no reason to address the — in any case erroneous — comments of your anonymous expert. On the basis of this incident I prefer to publish the paper elsewhere."



Realność fal grawitacyjnych ...

Nigdy więcej nie posłał pracy do Phys. Rev.

Po przemyśleniu argumentów Robertsona w zmodyfikowanej wersji praca ukazała się w Journal of the Franklin Institute pod tytułem „On gravitational wave”

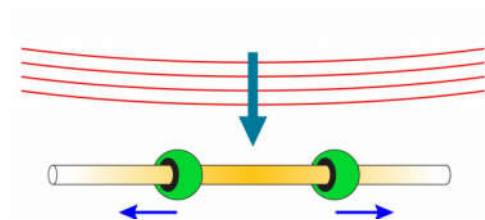
fragment streszczenia

"The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of rigorous solutions for undulatory gravitational fields, we investigate rigorously the case of cylindrical gravitational waves. It turns out that rigorous solutions exist and that the problem reduces to the usual cylindrical waves in Euclidean space."

Realność fal grawitacyjnych ...



Richard Feynman 1957
Konferencja relatywistów w
Chapel Hill N.C.
dowodzi, że fala grawitacyjna
może wykonać pracę mechaniczną



... stało się to inspiracją dla
J. Webera

Felix Pirani, Herman Bondi ...



Andrzej Trautman + Ivor Robinson 1962
nowa klasa rozwiązań r. Einsteina
sferyczne fale grawitacyjne;
dowodzi, że fale grawitacyjne przenoszą energię

podał ścisłą definicję fali grawitacyjnej
w pełnej (niezlinearyzowanej) wersji
OTW!

A. Trautman - zapalił zielone światło dla badania fal grawitacyjnych

Nauka

Nagroda Nobla dla profesora Andrzeja Trautmana za fale grawitacyjne? Trzymamy kciuki!

Piotr Cieśliński 22 lutego 2016 | 19:45



List polskich fizyków do profesora Andrzeja Trautmana:

Szanowny Panie Profesorze,

Piszemy ten list w związku z ogłoszonym w dniu 11 lutego 2016 roku faktem detekcji fal grawitacyjnych. Korzystając z tej okazji, pragniemy przypomnieć Pański fundamentalny wkład w tę, właśnie teraz przeżywającą swój wielki triumf, dziedzinę wiedzy.

Chociaż detekcja fal grawitacyjnych jest osiągnięciem przede wszystkim doświadczalnym, nie byłaby ona możliwa bez zdefiniowania, czym są fale grawitacyjne w pełnej teorii Einsteina. Pańskie prace, z przełomu lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych, leżą u samych podstaw teorii promieniowania grawitacyjnego i między innymi podają jego definicję.



Bohdan Paczyński
1940–2007

BIOGRAPHICAL

Memoirs

A Biographical Memoir by
Bruce T. Draine



©2017 National Academy of Sciences.
Any opinions expressed in this memoir are
those of the author and do not
necessarily reflect the views of the
National Academy of Sciences.



NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

Wspomnienia o Bohdanie Paczyńskim

[http://www.nasonline.org/
publications/
biographical-memoirs/
memoir-pdfs/
paczynski-bohdan.pdf](http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/paczynski-bohdan.pdf)

ACTA ASTRONOMICA
Vol. 17, (1967) No 3

Gravitational Waves and the Evolution of Close Binaries

by

B. Paczyński

ABSTRACT

The rate of period changes and the time scale of collapse caused by the gravitational radiation is tabulated as a function of orbital period of a binary. It is shown that the time scale of collapse is of the same order of magnitude as the time scale of the nuclear evolution for W UMa type binaries. The influence of gravitational radiation on the evolution of novae, U Geminorum type stars, and pairs of white dwarfs is discussed. It is shown that the evolution of WZ Sge and HZ 29 might be considerably affected by this phenomenon.

Wielkie pytania:

Czy można na Ziemi wytworzyć fale grawitacyjne?

Czy można zarejestrować fale grawitacyjne
w laboratorium?

Czy natura dostarcza nam źródeł fal grawitacyjnych?

Kwadrupolowa natura promieniowania grawitacyjnego

$$h_{ij}(x, t) = \frac{2}{r} \frac{G}{c^4} \frac{d^2}{dt^2} Q_{ij}(ct - r) \quad Q_{ij}(t) = \int d^3x \rho(x, t) \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} x^2 \right)$$

Moc promieniowania

$$\frac{c^5}{G} = 3.6 \times 10^{52} W = 2. \times 10^5 \frac{M_o c^2}{s}$$

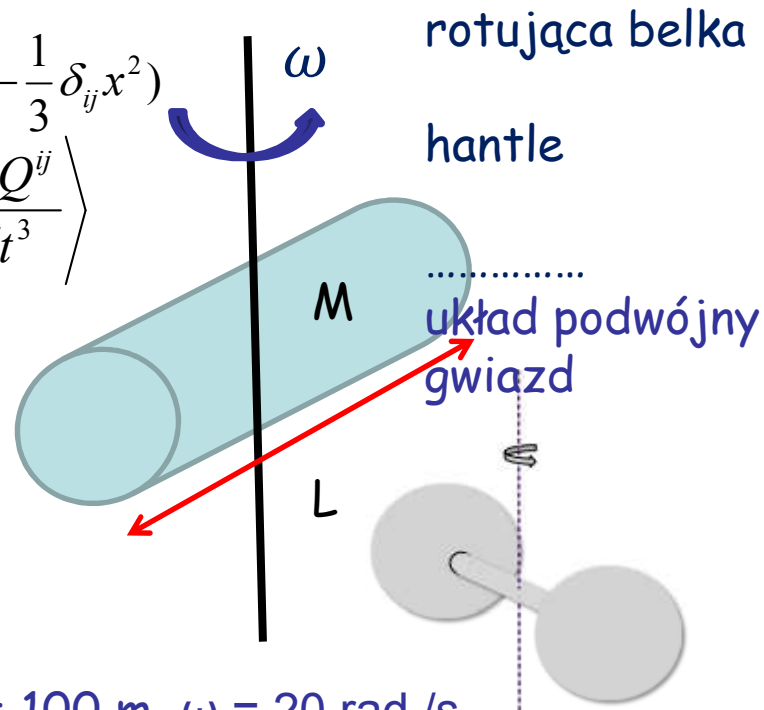
$$L_{GW} = \frac{1}{5} \frac{G}{c^5} \left\langle \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} \frac{d^3 Q^{ij}}{dt^3} \right\rangle$$

$$L_{GW} \propto \frac{G}{c^5} M^2 L^4 \omega^6$$

$$M = 10^6 \text{ kg} \quad L = 100 \text{ m} \quad \omega = 20 \text{ rad/s}$$

$$L_{GW} = 10^{-26} \text{ W}$$

Odpada idea eksperymentu typu „Hertza”



Kwadrupolowa natura promieniowania grawitacyjnego

$$h_{ij}(x,t) = \frac{2}{r} \frac{G}{c^4} \frac{d^2}{dt^2} Q_{ij}(ct-r) \quad Q_{ij}(t) = \int d^3x \rho(x,t) \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} x^2 \right)$$

Moc promieniowania

$$\frac{c^5}{G} = 3.6 \times 10^{52} W = 2. \times 10^5 \frac{M_o c^2}{s}$$

$$L_{GW} = \frac{1}{5} \frac{G}{c^5} \left\langle \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} \frac{d^3 Q^{ij}}{dt^3} \right\rangle$$

$$L_{GW} \propto \frac{G}{c^5} M^2 L^4 \omega^6$$

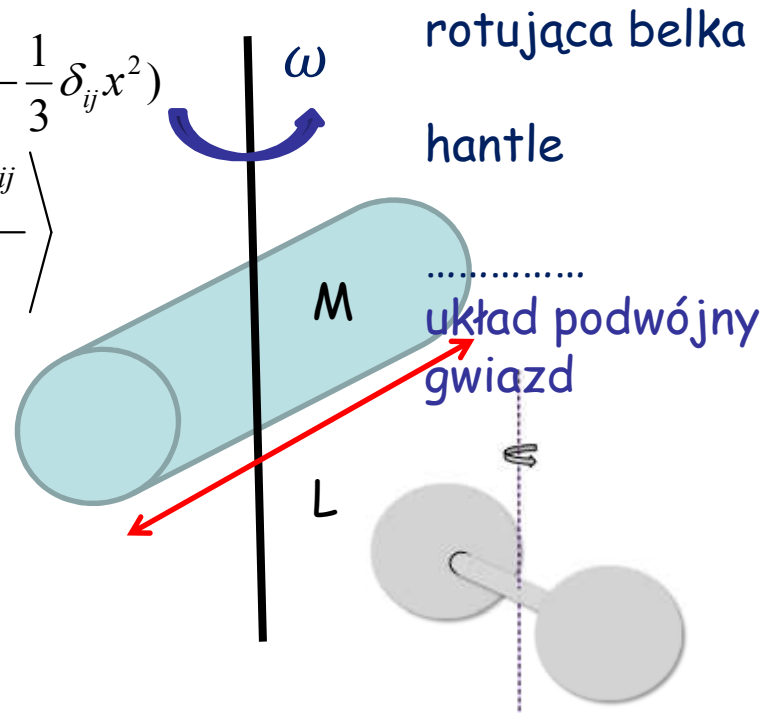
Joe Weber 1974

byłoby dobrze gdyby
czynniki (c^5/G) był w liczniku ...

Podstawmy: $M = \frac{r_s c^2}{2G}$ $\omega = \frac{v}{c} \frac{c}{r}$ $L = 2r$

$$L_G \propto \left(\frac{r_s c^2}{2G} \right)^2 (2r)^4 \left(\frac{v}{c} \right)^6 \left(\frac{c}{r} \right)^6 \frac{G}{c^5} = 4 \left(\frac{r_s}{r} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6 \frac{c^5}{G}$$

Mechanizmy generacji fal grawitacyjnych są efektywne w układach o rozmiarach rzędu r_g i prędkościach rzędu c



Kwadrupolowa natura promieniowania grawitacyjnego

$$h_{ij}(x, t) = \frac{2}{r} \frac{G}{c^4} \frac{d^2}{dt^2} Q_{ij}(ct - r)$$

$$\frac{c^5}{G} = 3.6 \times 10^{52} W = 2. \times 10^5 \frac{M_{\odot} c^2}{s}$$

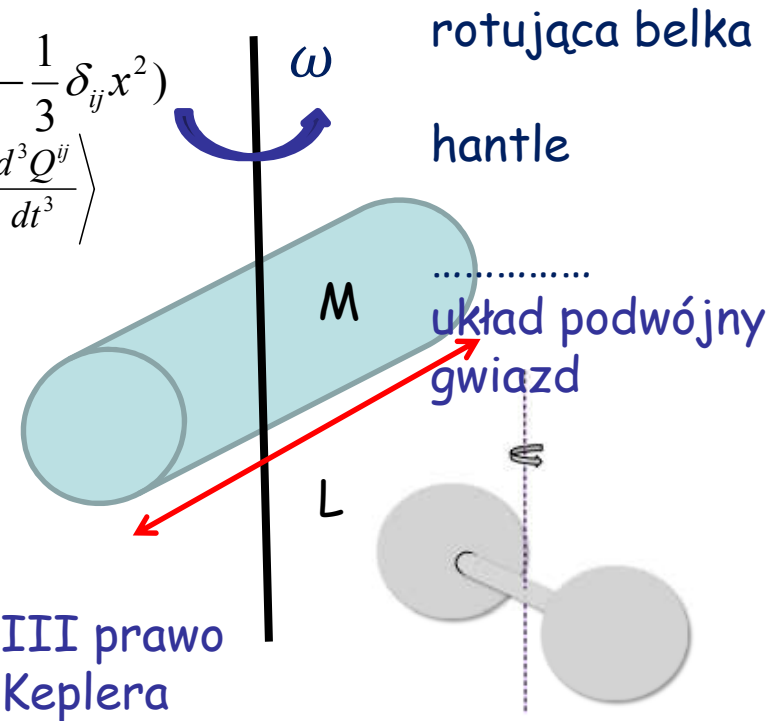
Mechanizmy generacji fal grawitacyjnych są efektywne w układach o rozmiarach rzędu r_g i prędkościach rzędu c

$$Q_{ij}(t) = \int d^3x \rho(x, t) (x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} x^2)$$

$$L_{GW} = \frac{1}{5} \frac{G}{c^5} \left\langle \frac{d^3 Q_{ij}}{dt^3} \frac{d^3 Q^{ij}}{dt^3} \right\rangle$$

$$L_{GW} \propto \frac{G}{c^5} M^2 L^4 \omega^6$$

$$L_G \propto 4 \left(\frac{r_s}{r} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6 \frac{c^5}{G}$$



$$f_{GW} = 2f_{orb}$$

$$f_{GW} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

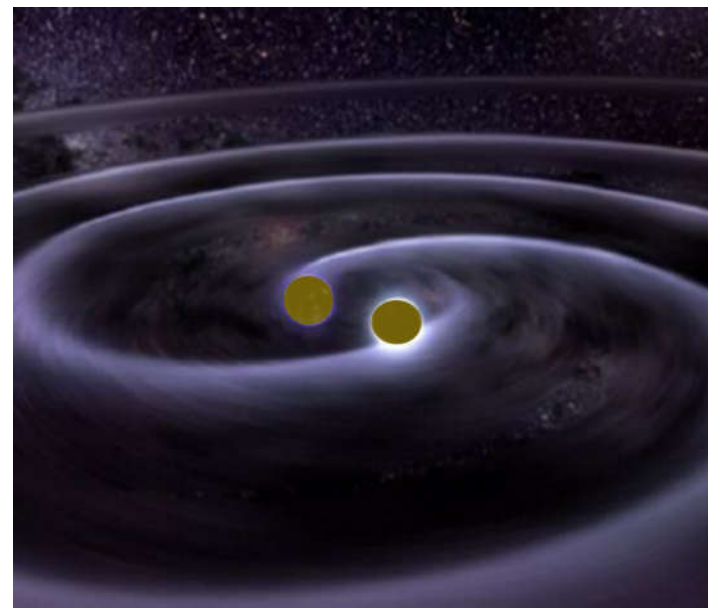
$$R \geq R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Górna granica częstotliwości fali grawitacyjnej z układu podwójnego

$$f_{GW}(M) < \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \frac{c^3}{GM} \approx 10^4 \text{ Hz} \left(\frac{M_0}{M} \right)$$

Górna granica częstotliwości fali grawitacyjnej z układu podwójnego

$$f_{GW}(M) < \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \frac{c^3}{GM} \approx 10^4 \text{ Hz} \left(\frac{M_0}{M} \right)$$



1 M_0 10^4 Hz (10 kHz) gwiazdy neutronowe
NS

10 M_0 10^3 Hz (1 kHz)
100 M_0 10^2 Hz (0.1 kHz) } czarne dziury o masach gwiazdowych
SMBH

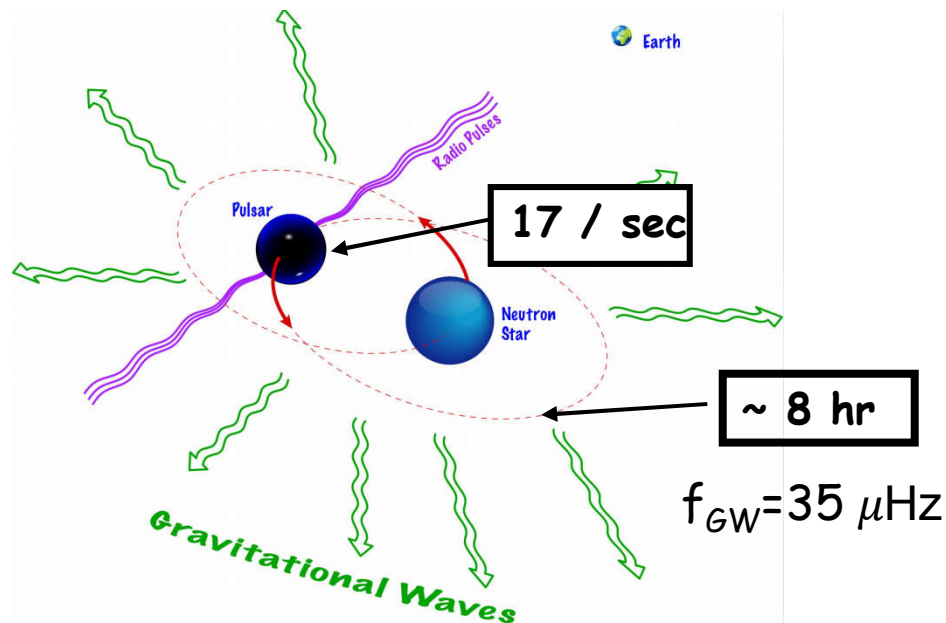
$10^3 M_0$ 10 Hz czarne dziury o masach pośrednich
IMBH (w gromadach kulistych)

$10^6 M_0$ 10^{-2} Hz (10 mHz)
 $10^9 M_0$ 10^{-5} Hz (10 μ Hz) } supermasywne czarne dziury
SMBH (w centrach galaktyk)

LIGO pasmo częstotliwości 10 Hz – 100 kHz

Pośredni dowód istnienia fal grawitacyjnych

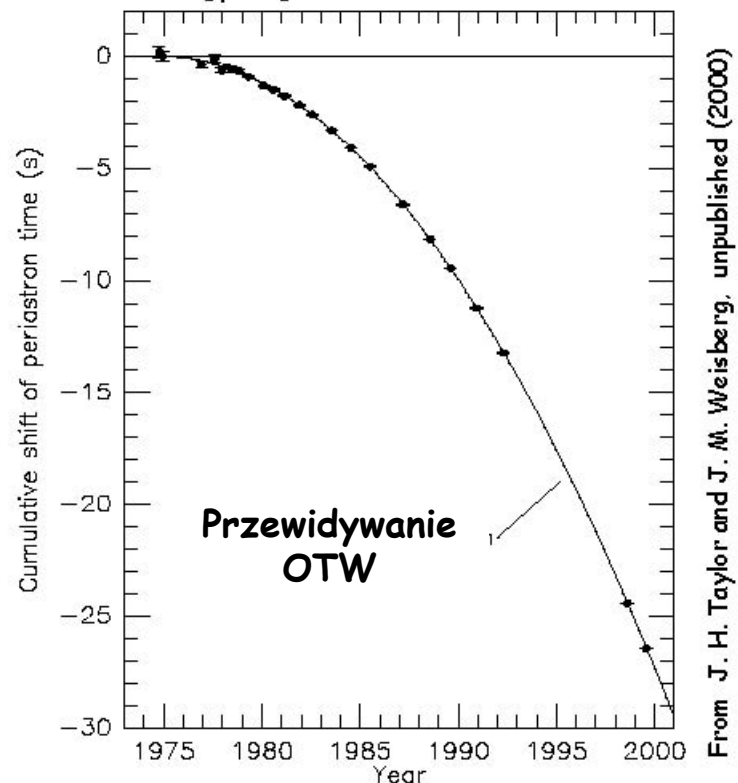
Układ podwójny gwiazd neutronowych
Hulse & Taylor - nagroda Nobla 1993
zmiana okresu: 30 sekund przez 25 lat



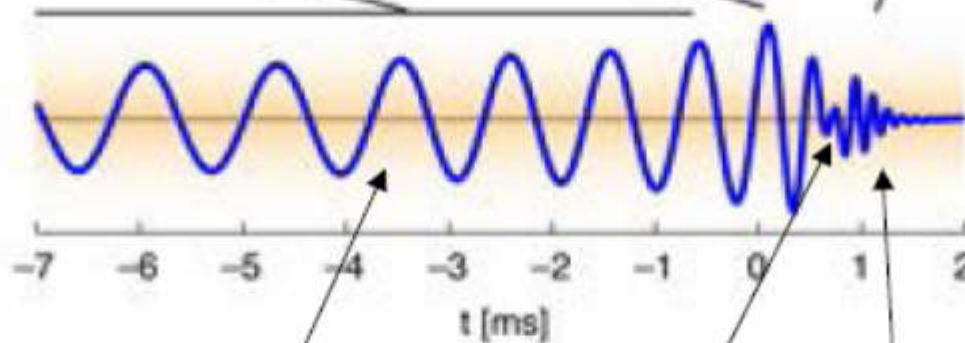
układ podwójny traci energię i moment pędu przez wypromieniowanie fal grawitacyjnych,

w wyniku czego promień orbity maleje o 3mm w czasie jednego obiegu → kiedyś (za 300 mln. lat) się zderzą! (tzw. koalescencja)

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



Ostatnie fazy ewolucji zwartego układu podwójnego (NS-NS, NS-BH, BH-BH)



Inspiral

Merger

Ringdown

Adiabatyczna
ewolucja - znana
(formalizm post-
newtonowski)

Drgania
kwazi-
normalne
znane

Relatywistyczny problem 2-ciał

Można tworzyć matryce sygnałów !

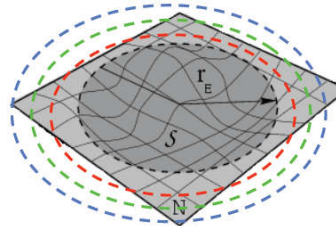
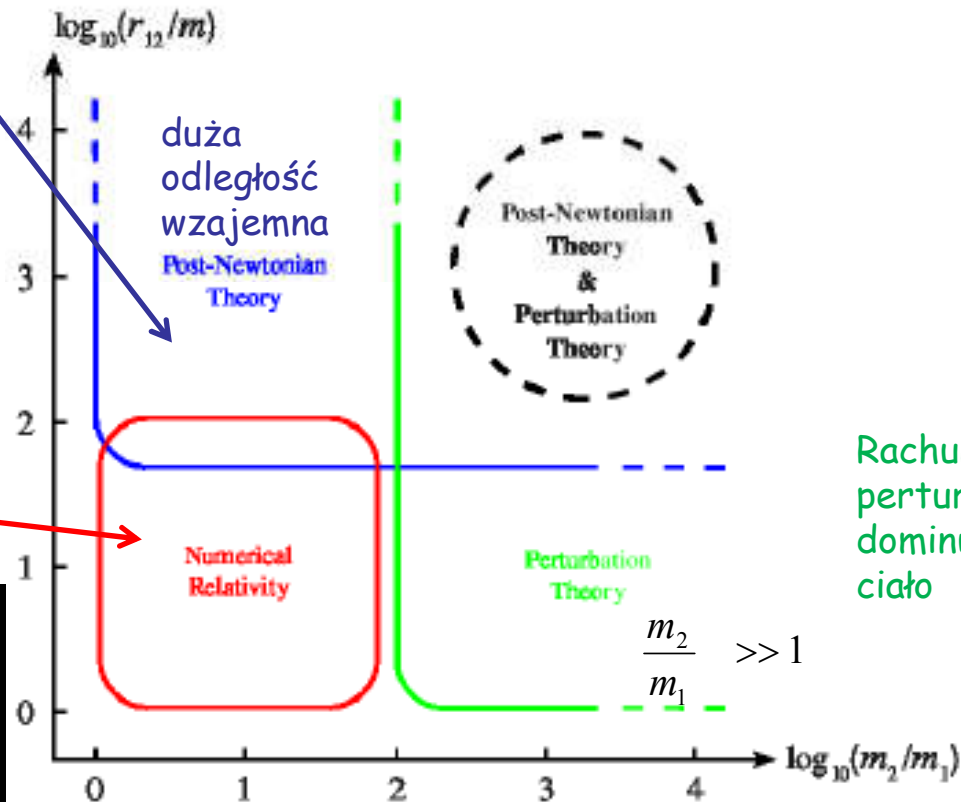
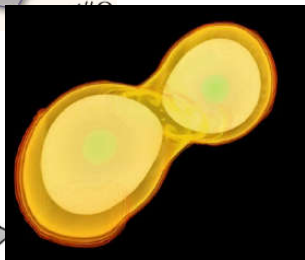
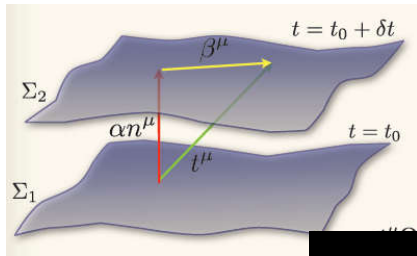
Rozwinięcie post Newtonowskie (PN)

względem ε

[nPN = $O(\varepsilon^n)$]

$$\varepsilon \propto \left(\frac{v}{c}\right)^2 \propto \frac{GM}{rc^2} \propto \frac{p}{\rho c^2} \ll 1$$

(Blanchet et al., Phys. Rev. D 81, 064004 (2010))

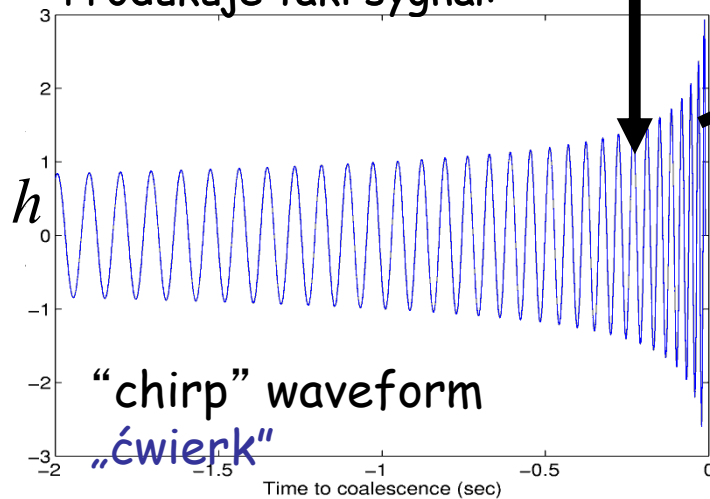


Poszukiwania koalescencji zwartych układów podwójnych

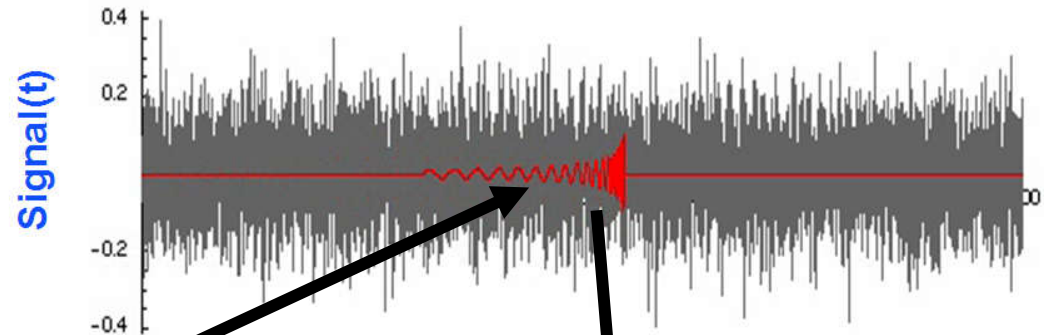
Źródło:



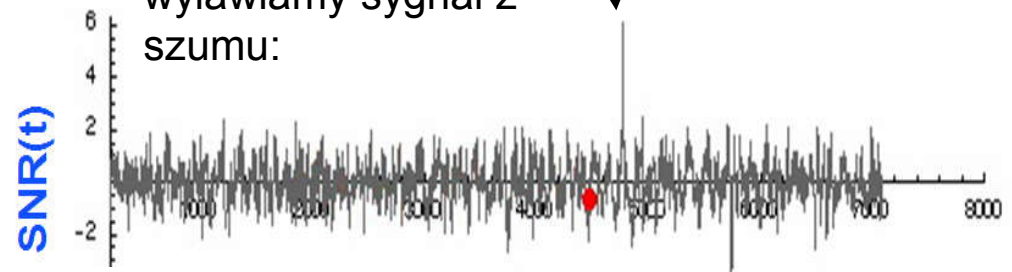
Produkuje taki sygnał:



Jest on ukryty w szumie detektora:



Metodą dopasowania szablonu (optymalnym filtrem Wienera) wyławiamy sygnał z szumu:



$$\rho^2 := (h|h) = 4\Re \int_0^\infty \frac{|\tilde{h}(f)|^2}{\tilde{S}(f)} df$$

Idea „standardowych syren”

Mierzmy amplitudę sygnału $h(t)$
oraz dryf częstotliwości df/dt

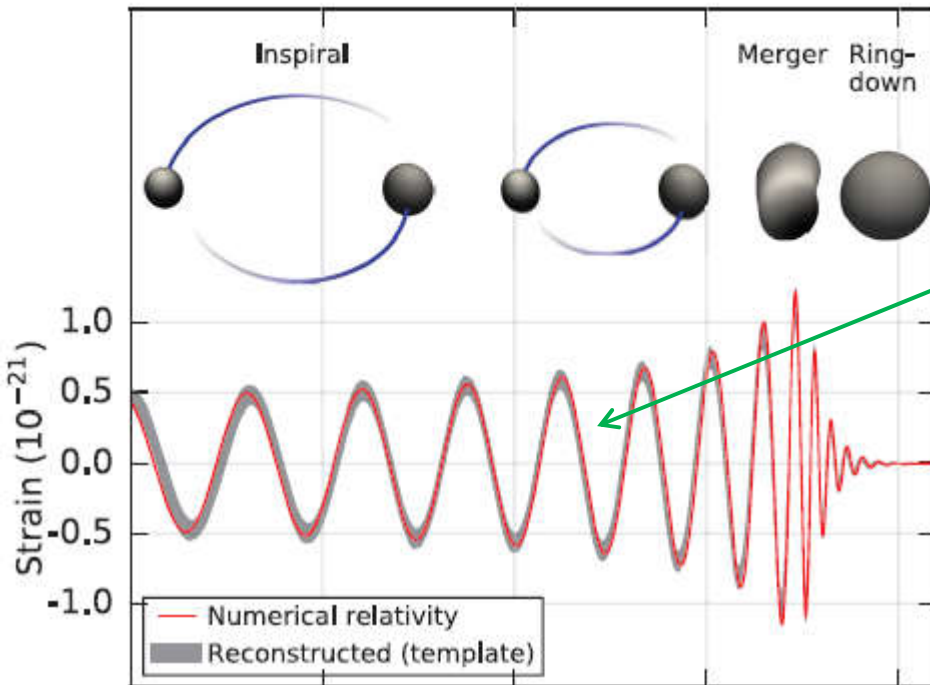
$$h = \frac{4\pi^{2/3}(GM)^{5/3}}{c^4 D} f(t)^{2/3} \cos \left[\int_0^t f(t') dt' \right]$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{96\pi^{8/3}}{5} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3}$$

2 równania na 2 niewiadome:
„masa ćwierku” M oraz odległość D

$$\mathcal{M} = \frac{c^3}{G} \left(\frac{5}{96\pi^{8/3}} \frac{df}{dt} \right)^{3/5} f^{-11/5}$$

$$D = \frac{4c}{\pi^2 h} \frac{df(t)}{dt} f^{-3} \cos \left(\int_0^t f(t') dt' \right)$$



B. Schutz 1986

B.Schutz, A. Królak 1987

Pionierzy budowy detektorów fal grawitacyjnych



Joseph Weber
1919 - 2000



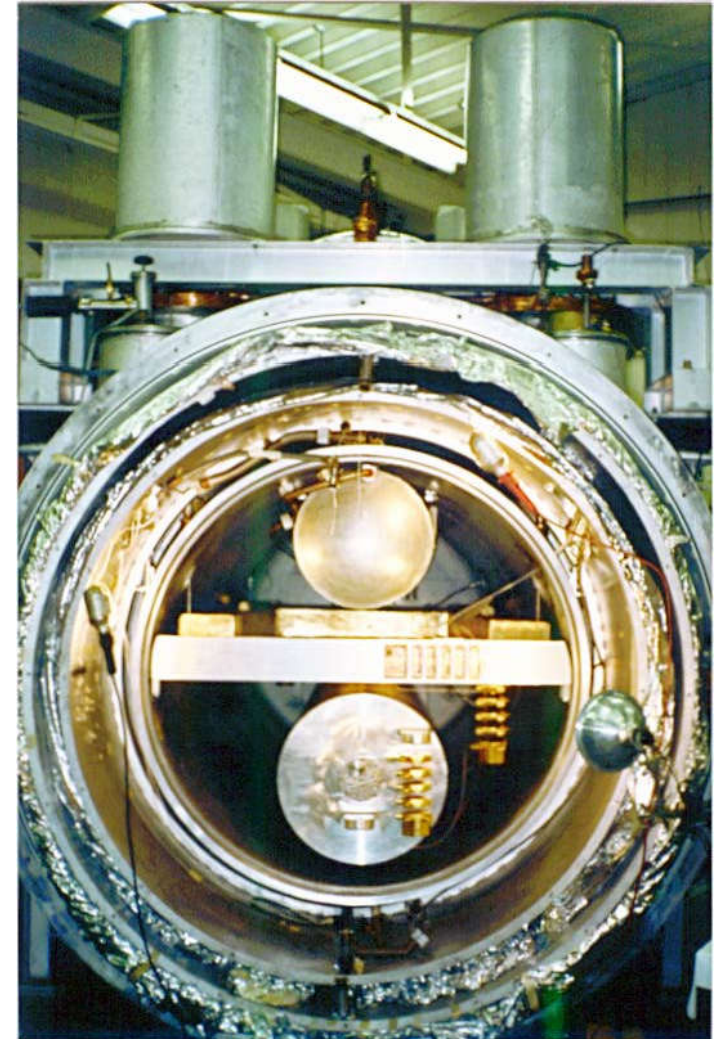
Vladimir Braginsky
1931 - 2016

Wcześniejsze detektory -
rezonansowe Weber, Braginski,
AURIGA, NAUTILUS,
TIGA (sferyczny)
mała czułość $h \sim 10^{-19}$ + wąski zakres częstotliwości

AURIGA Włochy



ALLEGRO USA



Detektor interferometryczny

Rainer Weiss, Ronald Drever

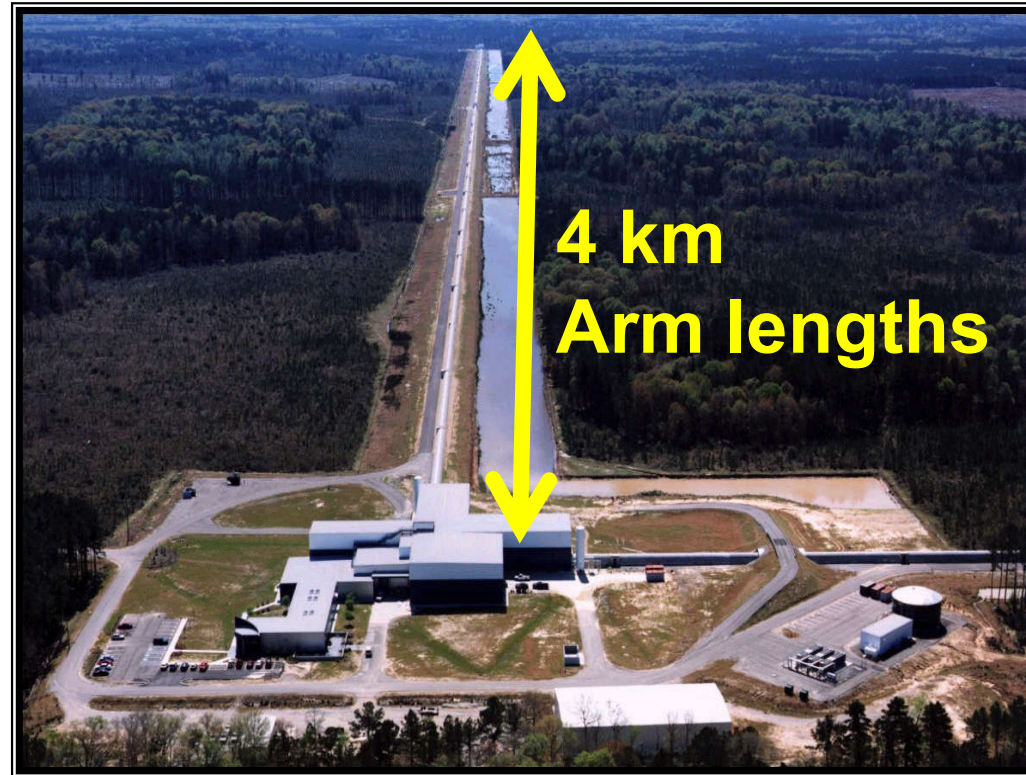
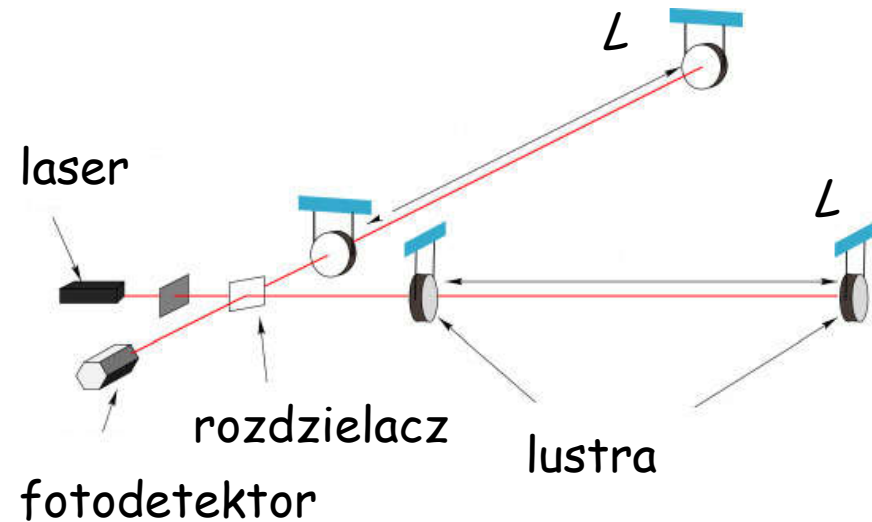
GEO600

TAMA300

LIGO

ok. 2000r

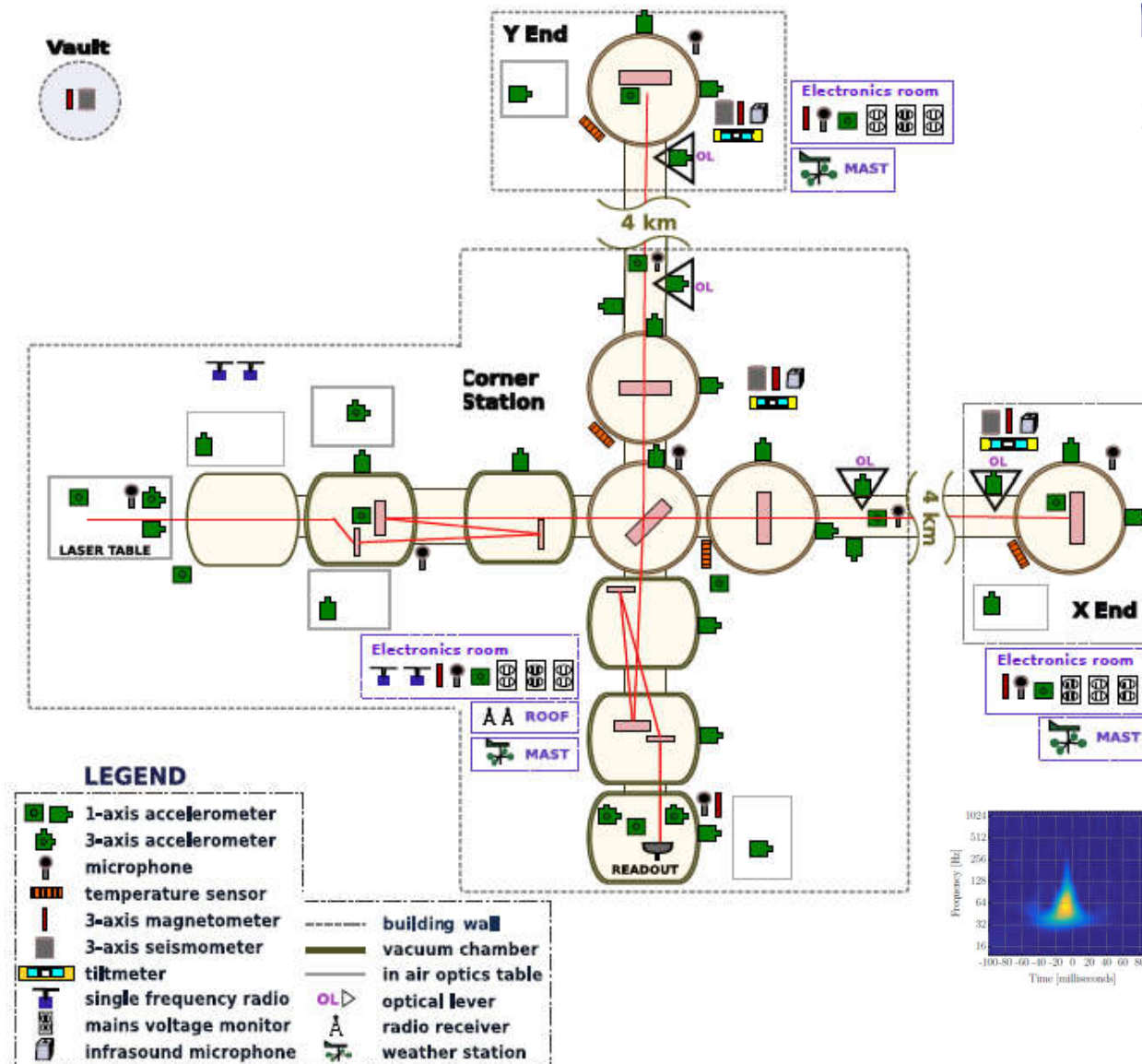
VIRGO



$$\Delta L \sim 10^{-16} \left(\frac{h}{10^{-21}} \right) \left(\frac{L}{km} \right) cm$$

(promień protonu $\sim 10^{-13}$ cm)

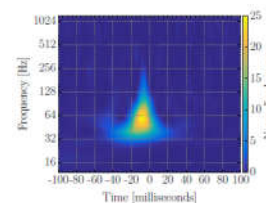
Noise characterization related to GW150914



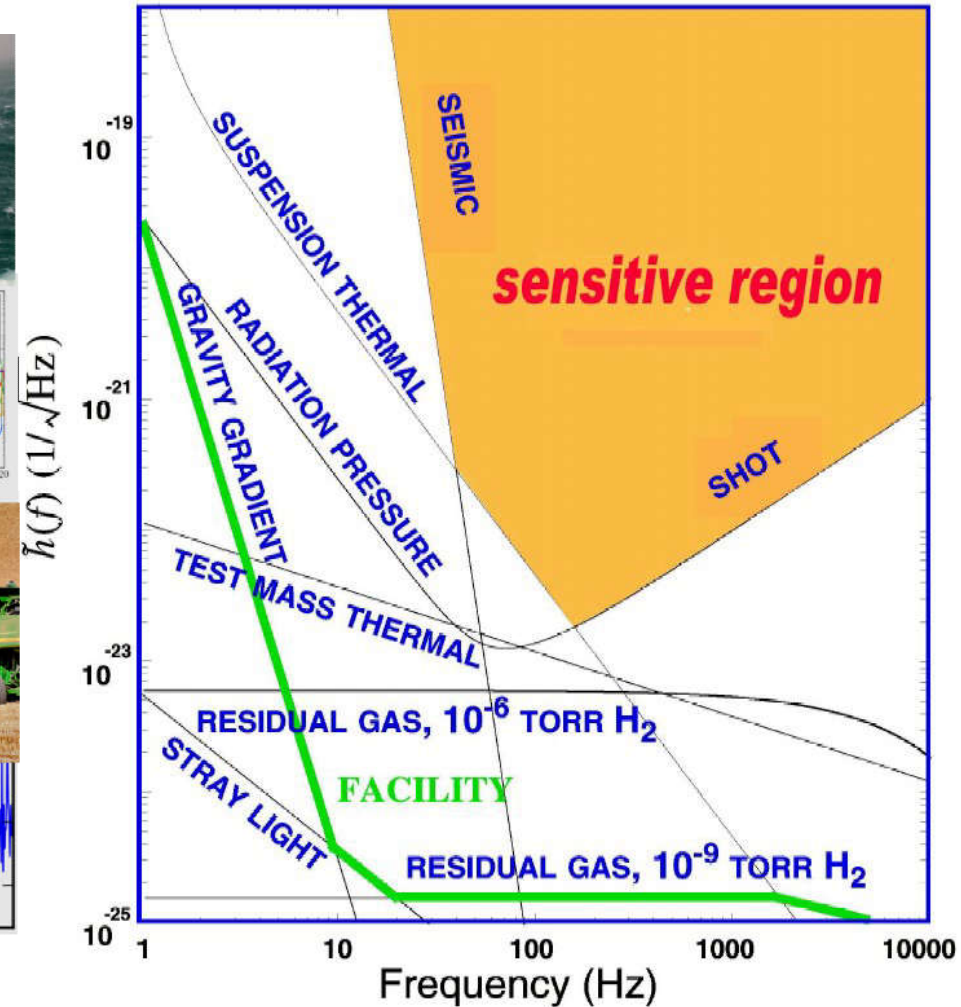
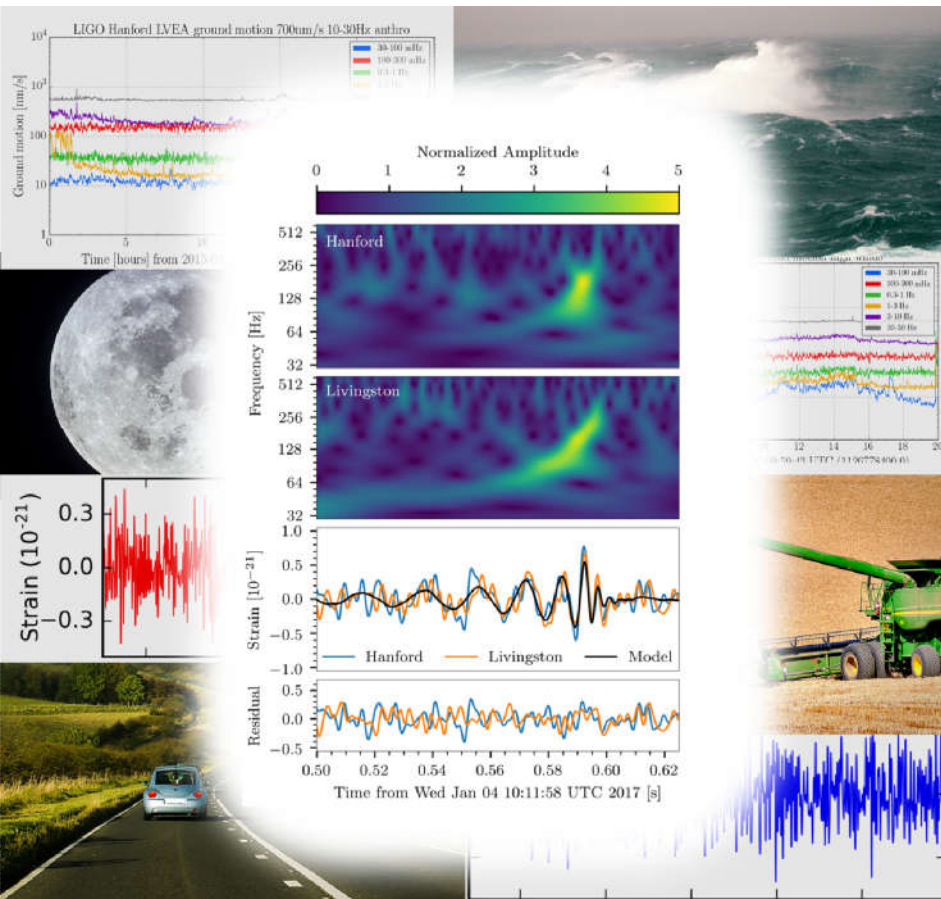
Każdy detektor wyposażony jest w sieć czujników monitorujących parametry otoczenia

200,000 kanałów informacyjnych

Szumy nieskorelowane
 antropogenne
 sejsmiczne
 szumy w układach OE
 „blip transients”
 skorelowane
 wyładowania atm.
 rozbłyski Słoneczne
 zburzenia magnetyczne
 promienie kosmiczne

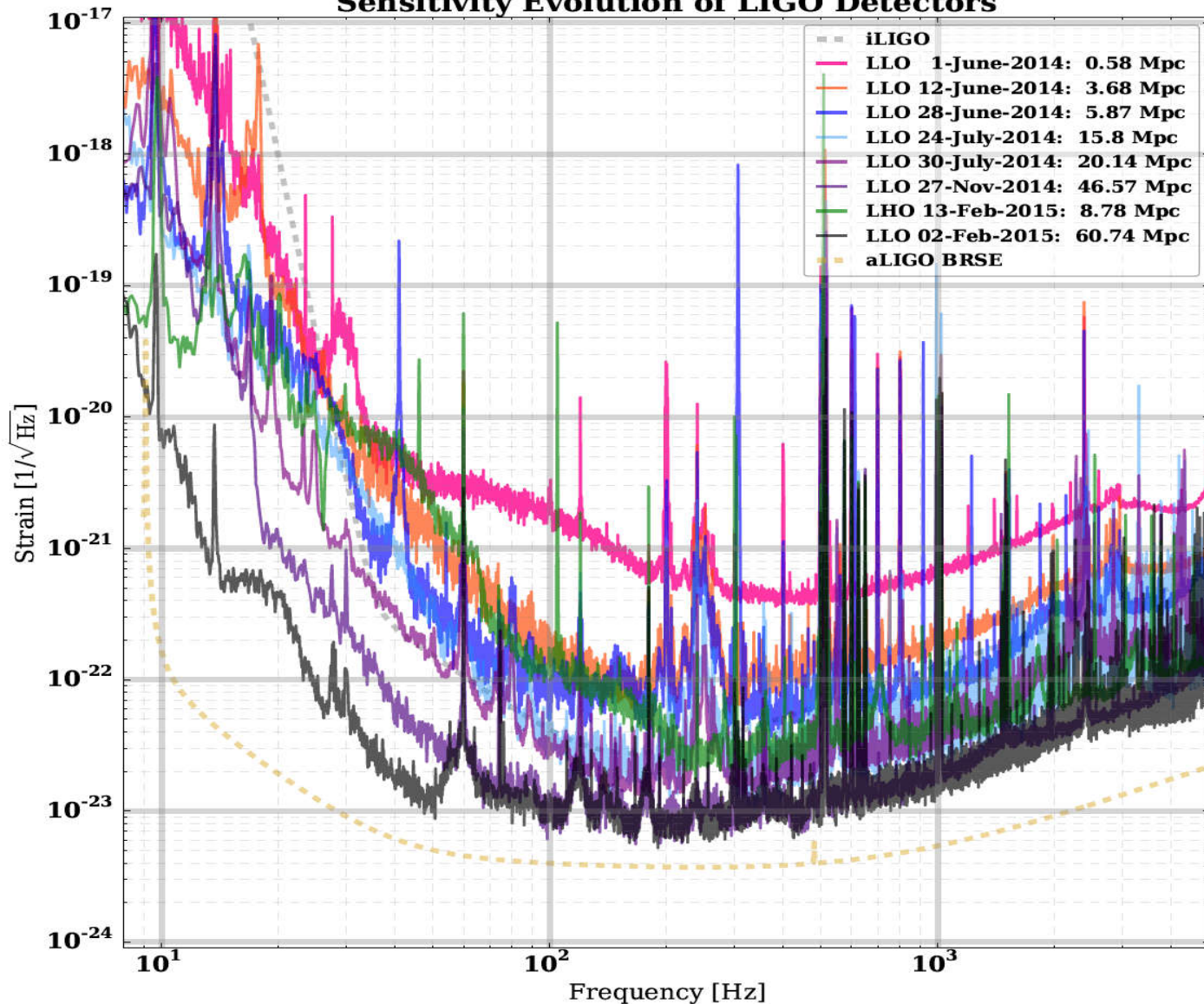


Czynniki kształtujące czułość detektorów naziemnych



Time Lapse: LIGO Sensitivity Progression

Sensitivity Evolution of LIGO Detectors



Krzywe czułości
detektora LIGO
na różnych etapach
ulepszania

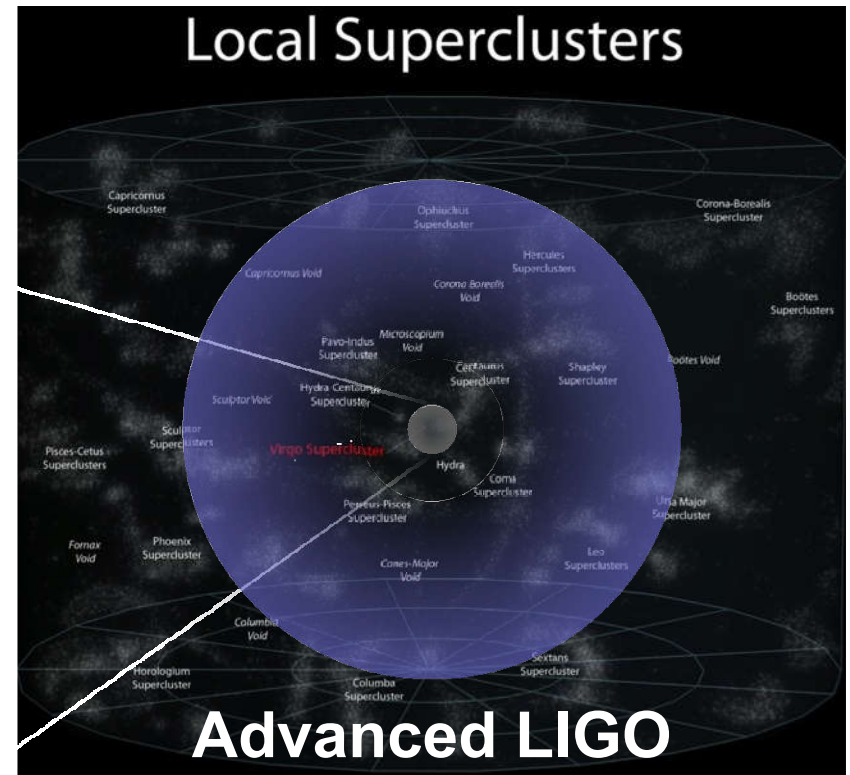
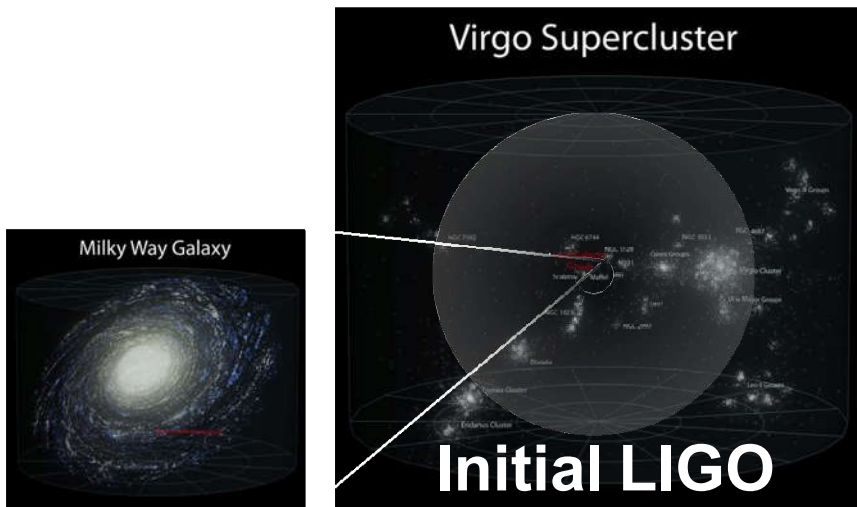
Upgrade LIGO do
AdLIGO
to koszt ok.
„0.03 LHC”

LIGO II generacji

- Całkowita przebudowa interferometrów LIGO
 - 10x większa czułość, 1000x większa objętość zasięgu
- Tempo detekcji - $O(10)$ zdarzeń rocznie przy nominalnej czułości
- Nowe okno na Wszechświat - dostarczy informacji, których fale elektromagnetyczne nie mogą dostarczyć

Porównanie:

- $O(100)$ galaktyk w zasięgu pierwszej fazy LIGO
- $O(100,000)$ galaktyk w zasięgu LIGO II generacji





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)

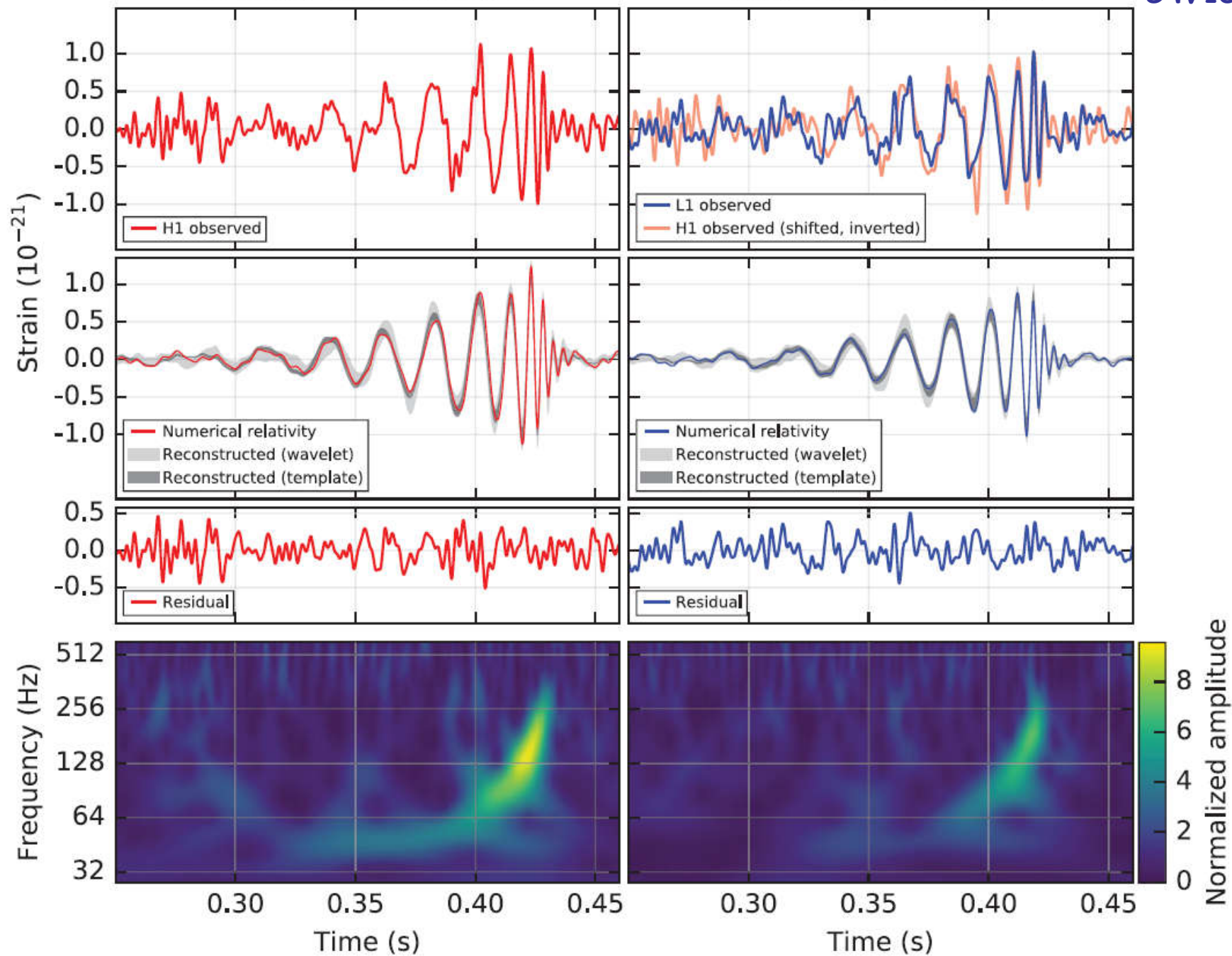
On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. 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.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

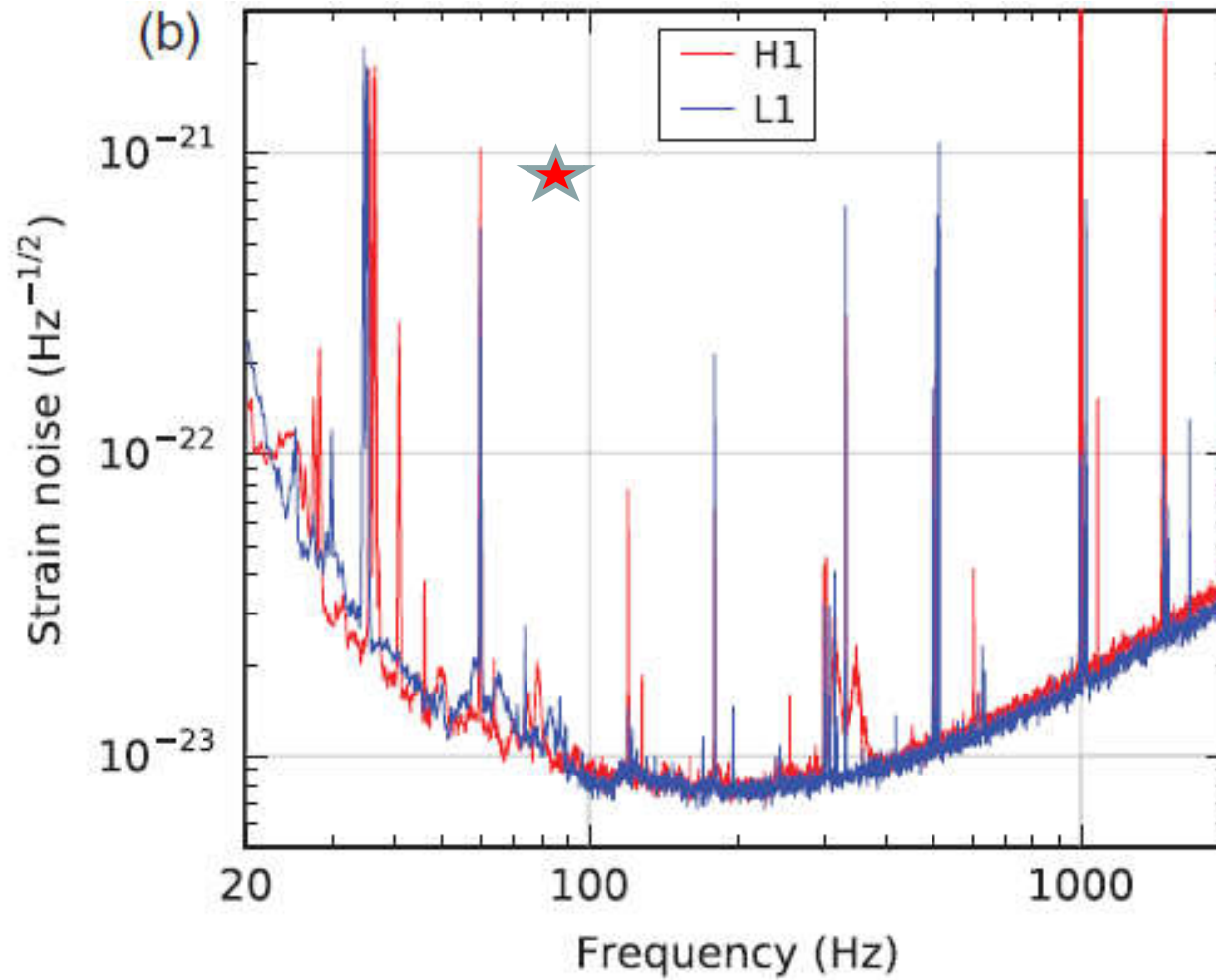
Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)

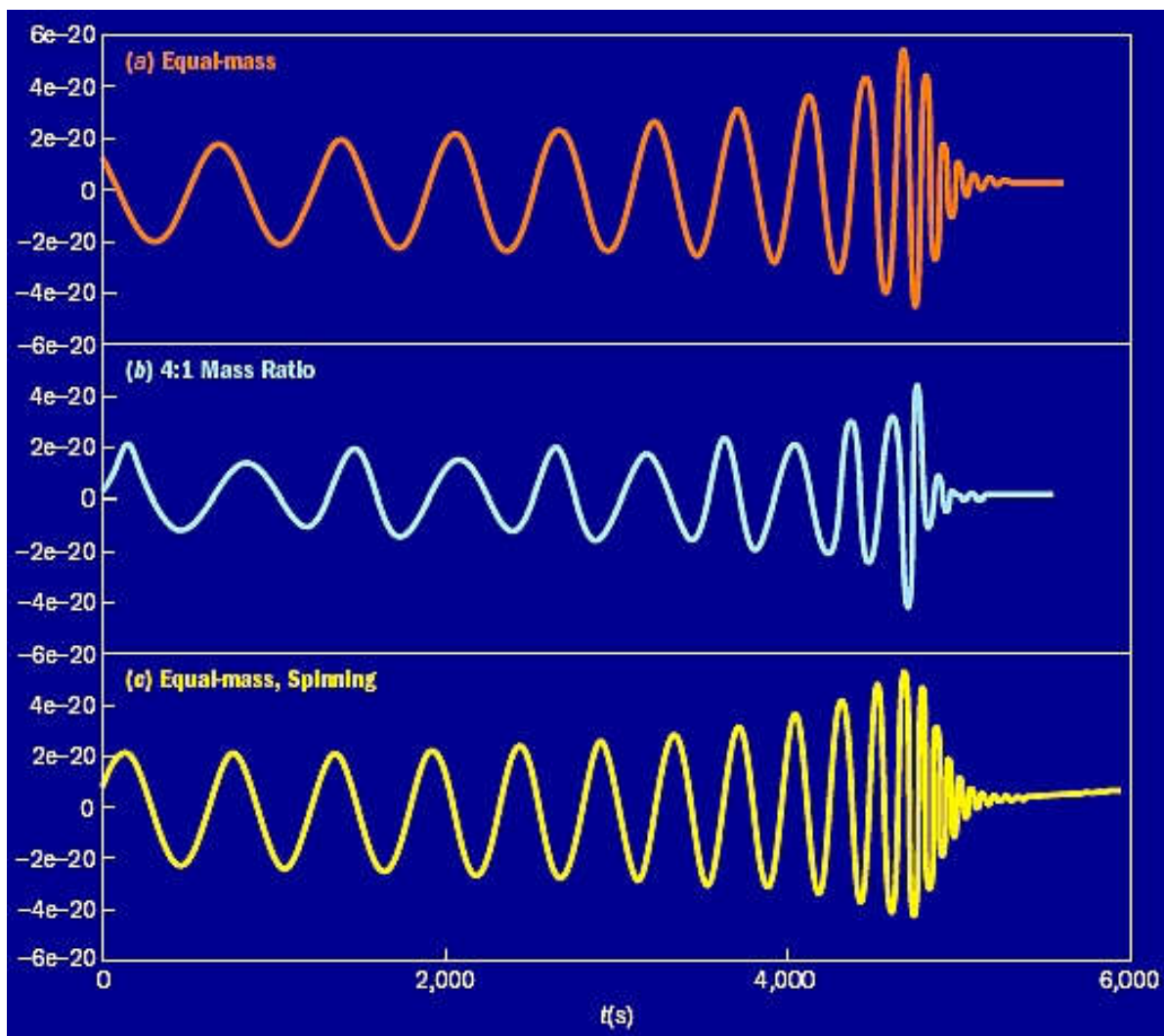
GW150914

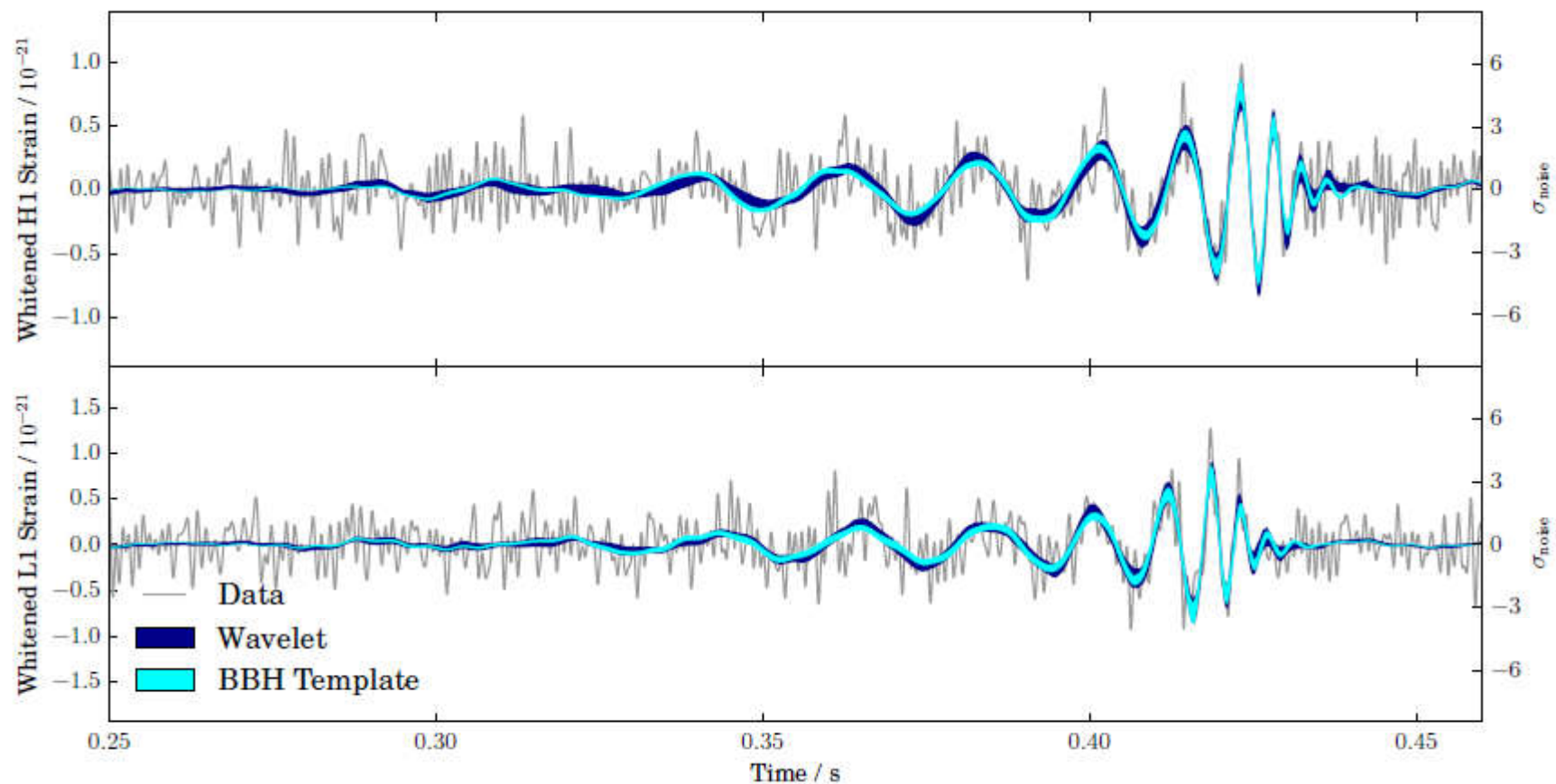


GW150914 na krzywej czułości



Biblioteka : 250 000 wzorców układów NS-NS, NS-BH i BH-BH o różnych parametrach





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	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

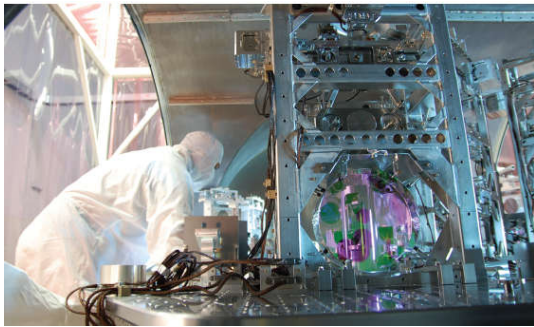
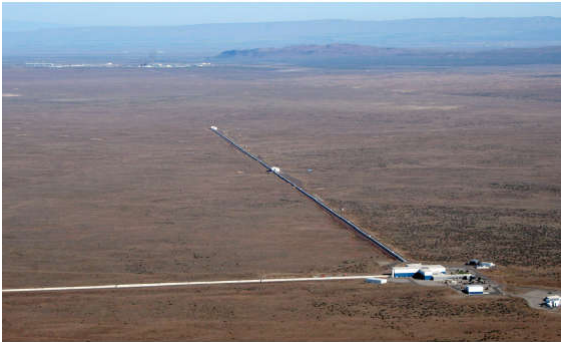
Najlepiej dopasowany wzorec odpowiada układowi BH-BH o parametrach jak w tabelce

Co ta detekcja oznaczała?

- Pierwsza detekcja laboratoryjna – triumf nauki i techniki
- Dowód istnienia masywnych czarnych dziur tworzących układy podwójne
- Potwierdzenie słuszności OTW w procesach koalescencji BH
- Otwarcie nowego okna na Wszechświat

LIGO opens new window on the universe with observation of gravitational waves from colliding black holes

LIGO PRESS RELEASE



PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016

GW150914

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

+ LVT 151012 !

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

PRL 118, 221101 (2017)

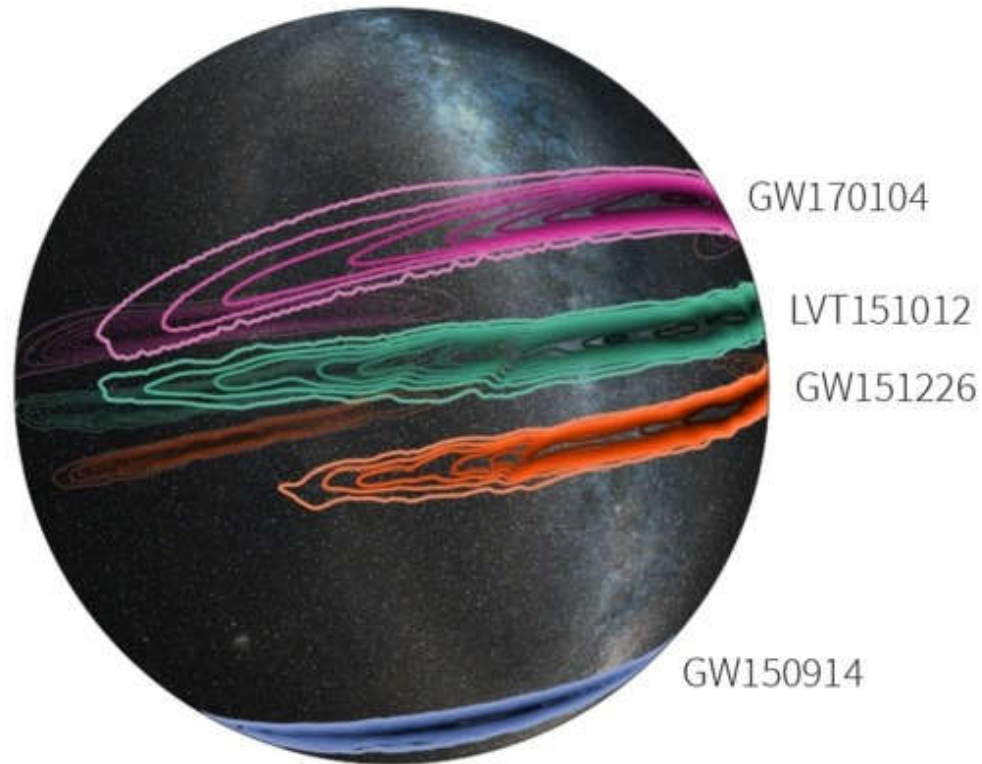
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
2 JUNE 2017

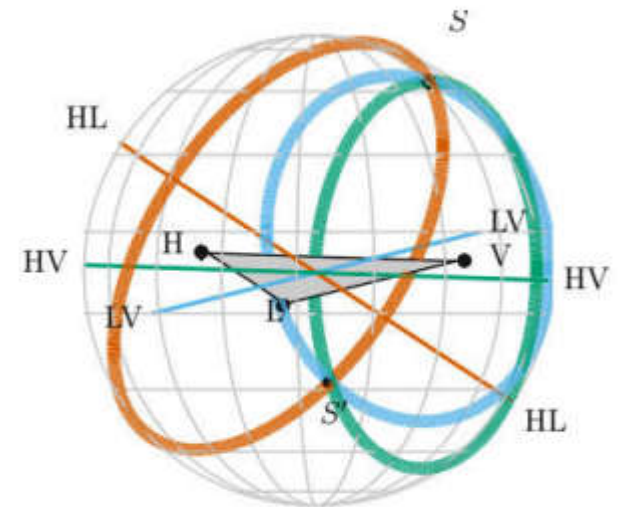
GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2

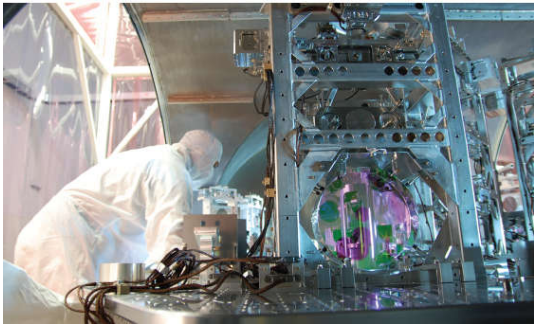
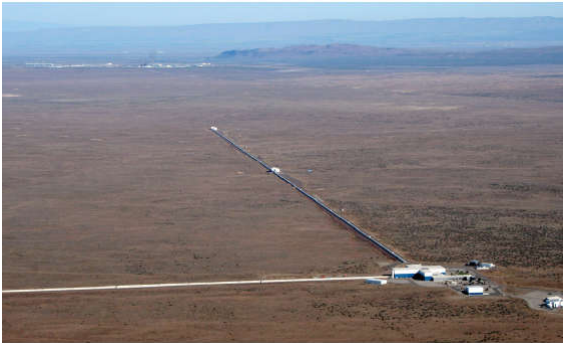
B. P. Abbott *et al.*^{*}
(LIGO Scientific and Virgo Collaboration)
(Received 9 May 2017; published 1 June 2017)

Detektory LIGO miały słabe możliwości lokalizacji źródła



Niecierpliwie czekano
na uruchomienie
Virgo !





PRL 119, 141101 (2017)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
6 OCTOBER 2017



GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence

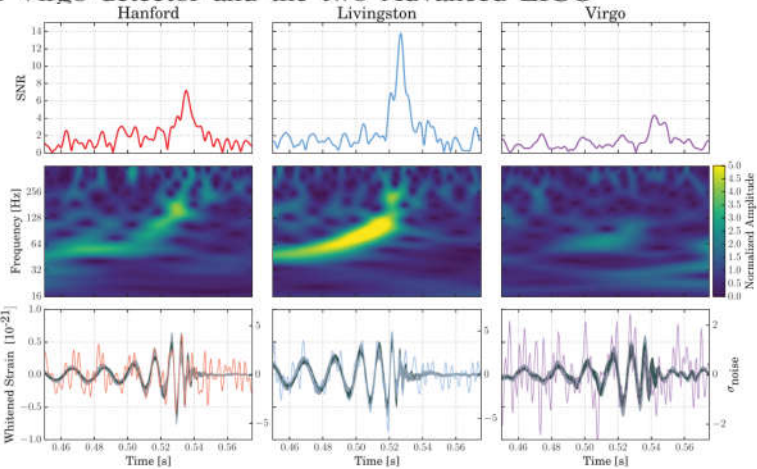
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 23 September 2017; published 6 October 2017)

On August 14, 2017 at 10:30:43 UTC, the Advanced Virgo detector and the two Advanced LIGO detectors coherently observed a transient gravitational-wave signal from the coalescence of two stellar mass black holes, with a false-alarm rate of $\lesssim 1$ in three-detector network matched-filter signal-to-noise ratio. The component black holes are $30.5^{+5.7}_{-3.0} M_{\odot}$ and $25.3^{+2.8}_{-4.2} M_{\odot}$ (at the 90% credible level), and the final black hole is $36.2^{+3.8}_{-3.4} M_{\odot}$. The source is localized to 540^{+130}_{-210} Mpc, corresponding to a redshift of $z = 0.11^{+0.03}_{-0.04}$. This localization, achieved by combining the LIGO detectors to 60 deg² using all three detectors, is the best localization of a gravitational-wave source to date. The observation provides new constraints on gravitational-wave polarizations from the antenna response and opens a new class of phenomenological tests of gravity.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.119.141101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.141101)



Electromagnetic emission

Merger of NS-NS / NS-BH

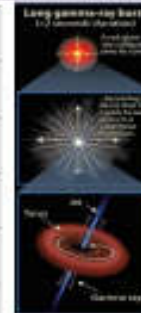
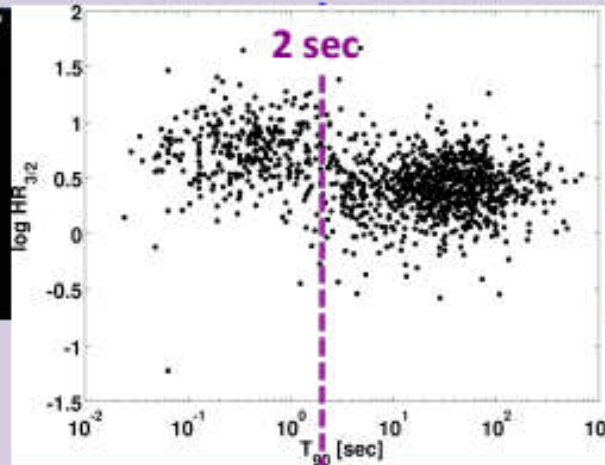
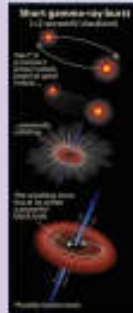
Core collapse of massive star

Gamma-Ray Burst

Short Hard GRB

Progenitor indications:

- lack of observed SN
- association with older stellar population
- larger distance from the host galaxy center ($\sim 5\text{-}10$ kpc)



Long Soft GRB

Progenitor strong evidence: observed Type Ic SN spectrum

Kilonovae

(Optical/IR, radio remnant)



Supernovae

Type II, Ib/c



Pierwszy model kilo-nowej (koalescencji dwóch gwiazd neutronowych)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 507:L59–L62, 1998 November 1

© 1998. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

ważny dla zrozumienia kosmicznej nukleosyntezy ...

TRANSIENT EVENTS FROM NEUTRON STAR MERGERS

LI-XIN LI AND BOHDAN PACZYŃSKI

Princeton University Observatory, Princeton, NJ 08544-1001; lxl@astro.princeton.edu, bp@astro.princeton.edu

Received 1998 July 27; accepted 1998 August 26; published 1998 September 21

ABSTRACT

Mergers of neutron stars (NS + NS) or neutron stars and stellar-mass black holes (NS + BH) eject a small fraction of matter with a subrelativistic velocity. Upon rapid decompression, nuclear-density medium condenses into neutron-rich nuclei, most of them radioactive. Radioactivity provides a long-term heat source for the expanding envelope. A brief transient has a peak luminosity in the supernova range, and the bulk of radiation in the UV-optical domain. We present a very crude model of the phenomenon, and simple analytical formulae that can be used to estimate the parameters of a transient as a function of poorly known input parameters. The mergers may be detected with high-redshift supernova searches as rapid transients, many of them far away from the parent galaxies. It is possible that the mysterious optical transients detected by Schmidt et al. are related to neutron star mergers, since they typically have no visible host galaxy.

Subject headings: binaries: close — gamma rays: bursts — stars: neutron — supernovae: general

GW 170817 – Nowa era astronomii wielu nośników informacji (multimessenger astronomy)

PRL **119**, 161101 (2017)

 Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
20 OCTOBER 2017



GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

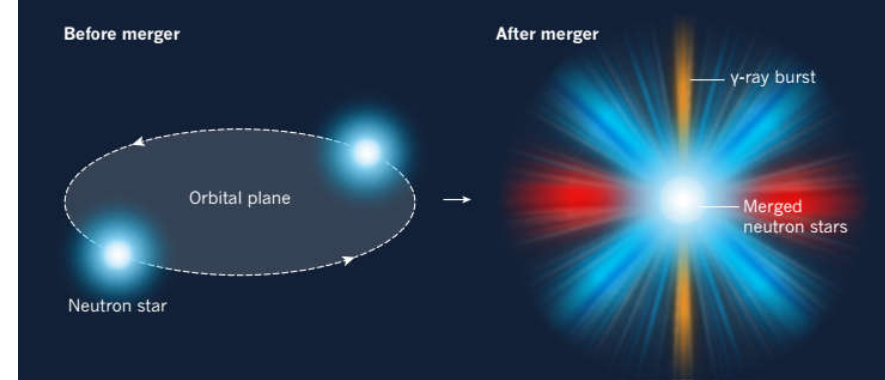
(Received 26 September 2017; revised manuscript received 2 October 2017; published 16 October 2017)

On August 17, 2017 at 12:41:04 UTC the Advanced LIGO and Advanced Virgo gravitational-wave detectors made their first observation of a binary neutron star inspiral. The signal, GW170817, was detected with a combined signal-to-noise ratio of 32.4 and a false-alarm-rate estimate of less than one per 8.0×10^4 years. We infer the component masses of the binary to be between 0.86 and $2.26 M_{\odot}$, in agreement with masses of known neutron stars. Restricting the component spins to the range inferred in binary neutron stars, we find the component masses to be in the range 1.17 – $1.60 M_{\odot}$, with the total mass of the system $2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$. The source was localized within a sky region of 28 deg^2 (90% probability) and had a luminosity distance of $40^{+8}_{-14} \text{ Mpc}$, the closest and most precisely localized gravitational-wave signal yet. The association with the γ -ray burst GRB 170817A, detected by Fermi-GBM 1.7 s after the coalescence, corroborates the hypothesis of a neutron star merger and provides the first direct evidence of a link between these mergers and short γ -ray bursts. Subsequent identification of transient counterparts across the electromagnetic spectrum in the same location further supports the interpretation of this event as a neutron star merger. This unprecedented joint gravitational and electromagnetic observation provides insight into astrophysics, dense matter, gravitation, and cosmology.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.119.161101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101)

GW170817 - narodziny astronomii wielu nośników informacji

17 sierpnia 2017 o godz. 12:41:04 UTC
detektory LIGO/Virgo zarejestrowały
pierwszy w historii sygnał grawitacyjny
z koalescencji układu dwóch gwiazd neutronowych (NS-NS)



Odpowiadający temu zdarzeniu sygnał elektromagnetyczny
został zarejestrowany

- w promieniach gamma 1.7 s po koalescencji

(Fermi Gamma-ray
Space Telescope
NASA, INTERGAL, Agile)

- w dziedzinie rentgenowskiej
(Swift, Magic, Integral)

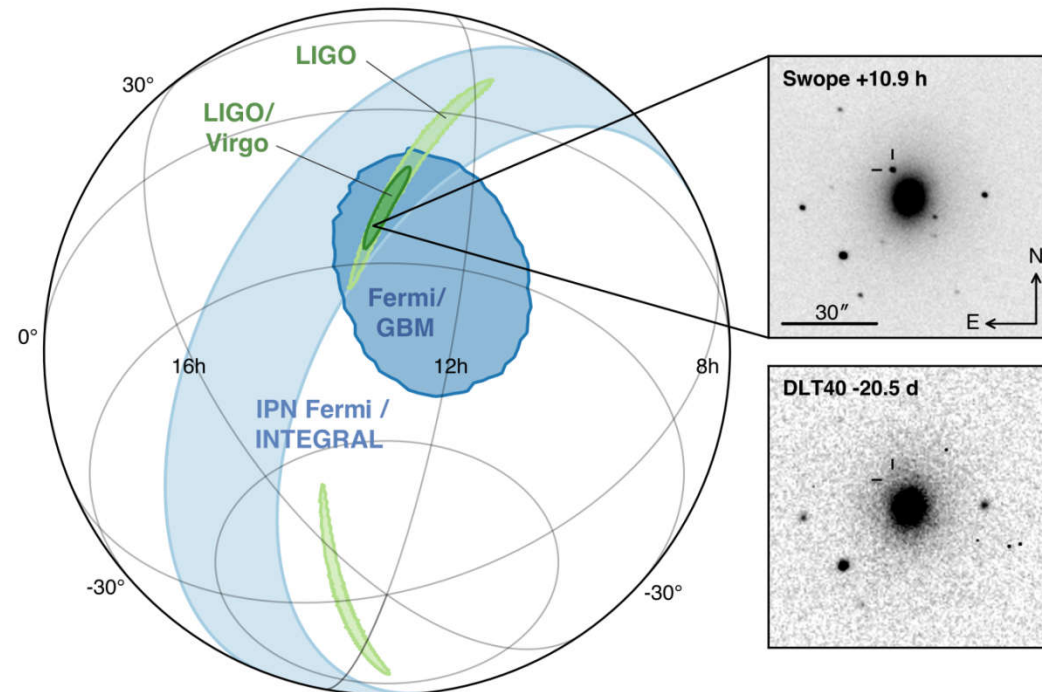
- w świetle widzialnym

- w podczerwieni

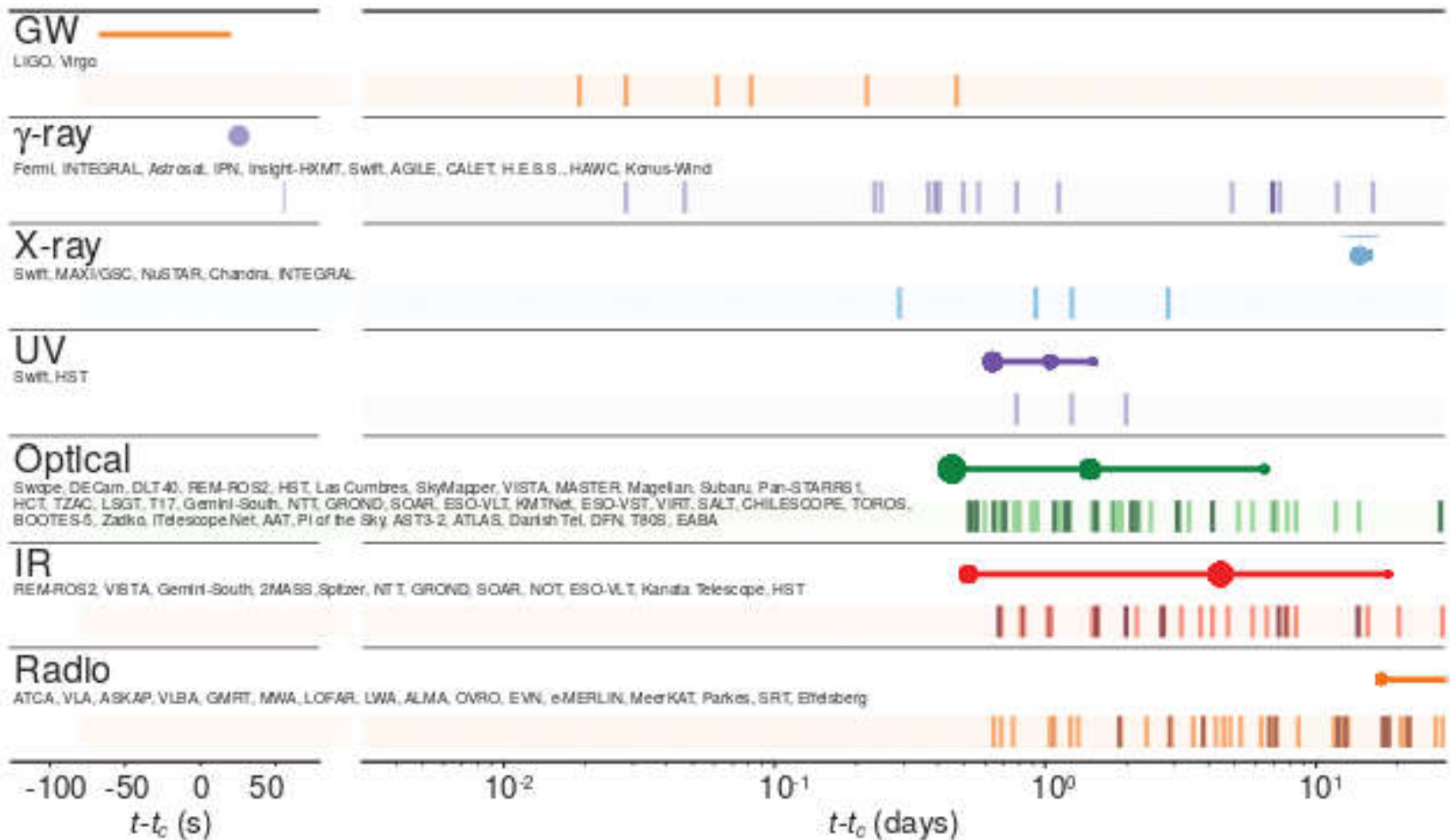
- 5 artykułów w Nature

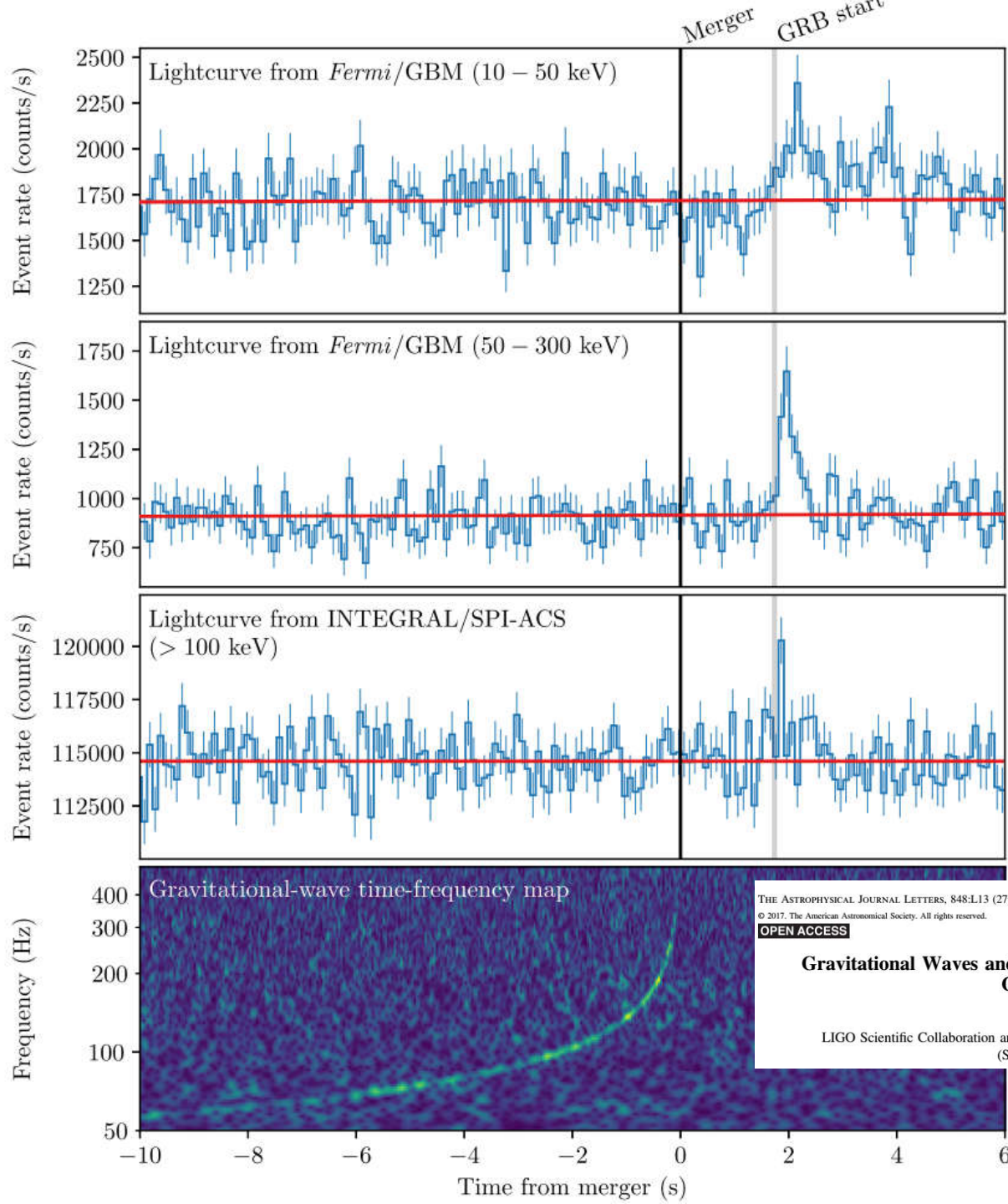
- dedykowany numer ApJ

- ponad 100 prac ukazało się
17.10.2017



Linia czasu GW170817 / GRB170817A / SSS17a / AT2017gfo





Joint multi-messenger detection of GW170817 and GRB170817A

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L13 (27pp), 2017 October 20

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

OPEN ACCESS

Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, *Fermi* Gamma-ray Burst Monitor, and INTEGRAL
(See the end matter for the full list of authors.)

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>



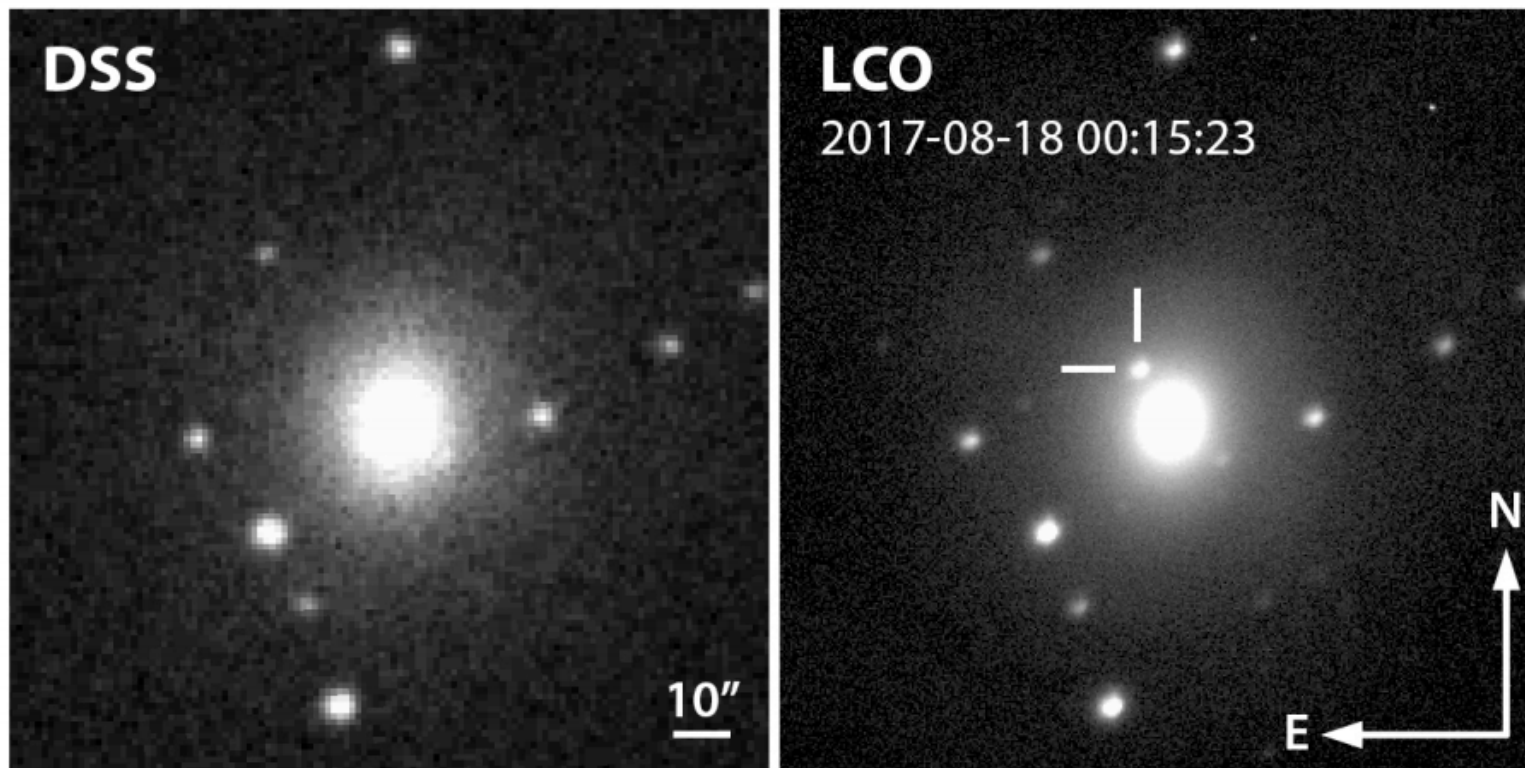


Figure 2 | LCO discovery image of the kilonova AT 2017gfo in the galaxy NGC 4993. The w-band LCO image (right), centered on NGC 4993, clearly shows a new source (marked with white ticks) compared to an archival image (left) taken on 1992 April 9 with the RG610 filter as part of the AAO-SES survey, retrieved via the Digitized Sky Survey (DSS).

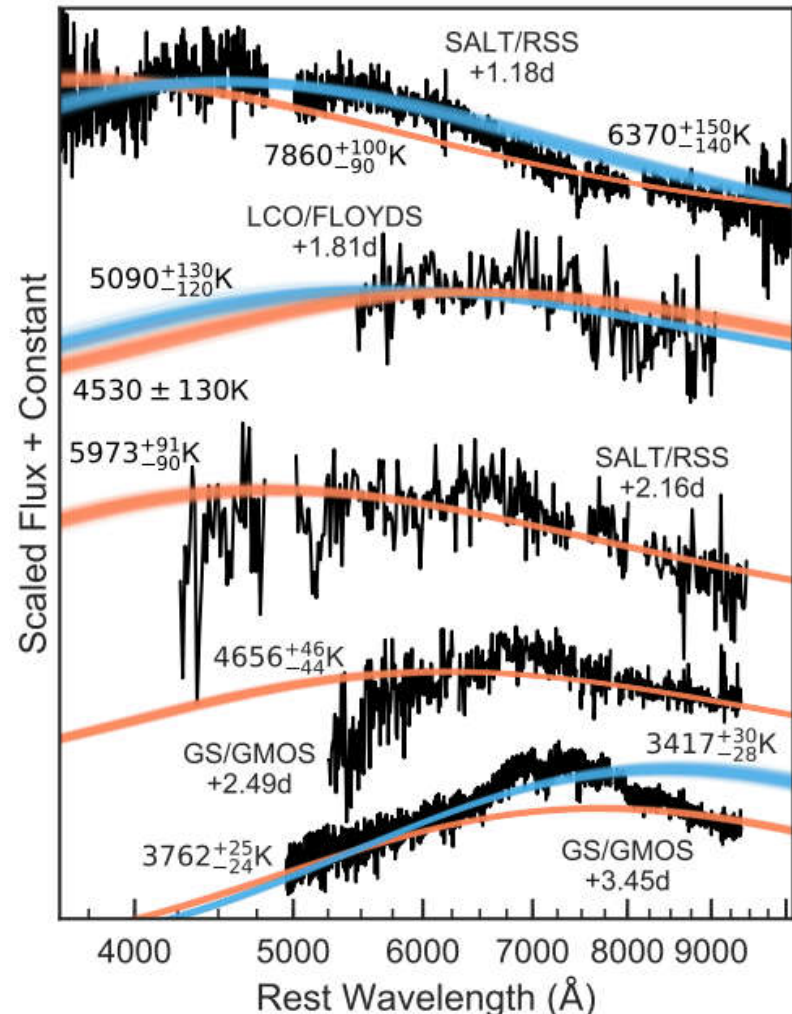
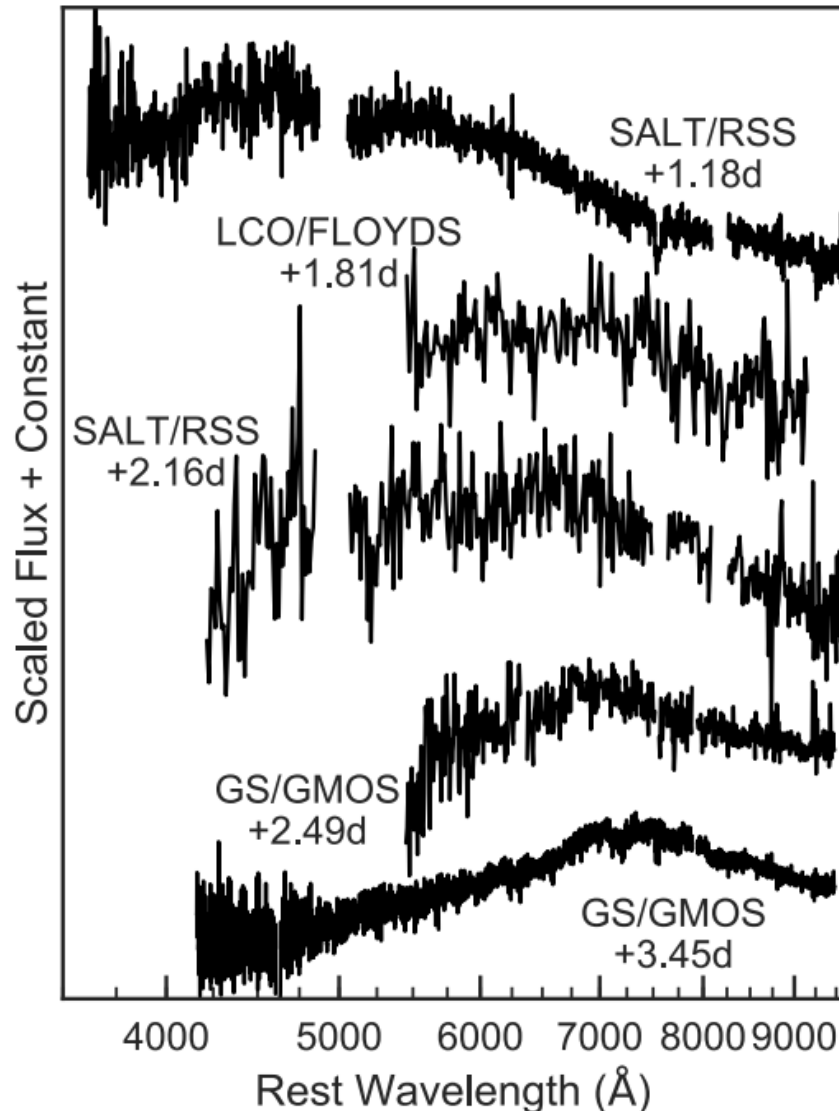
LCO - Las Cumbres Observatory; CTIO - Cerro Tololo Inter-American Observatory



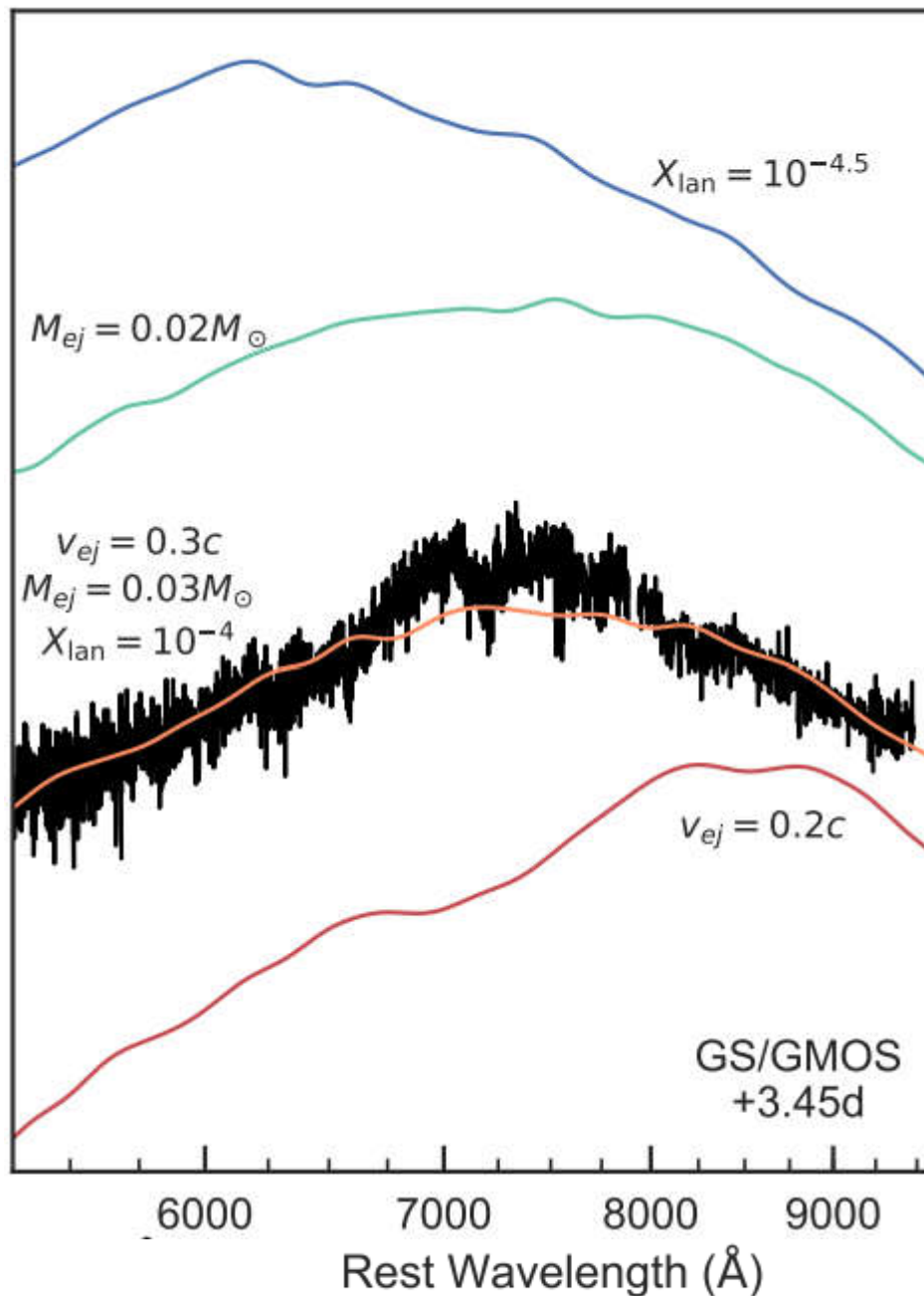
The Rapid Reddening and Featureless Optical Spectra of the Optical Counterpart of GW170817, AT 2017gfo, during the First Four Days

Curtis McCully^{1,2}, Daichi Hiramatsu^{1,2}, D. Andrew Howell^{1,2}, Griffin Hosseinzadeh^{1,2}, Iair Arcavi^{1,2,19}, Daniel Kasen^{3,4,5}, Jennifer Barnes^{6,19}, Michael M. Shara^{7,8}, Ted B. Williams⁹, Petri Väisänen^{9,10}, Stephen B. Potter⁹, Encarni Romero-Colmenero^{9,10}, Steven M. Crawford^{9,10}, David A. H. Buckley^{9,10}, Jeffery Cooke^{11,12,13}, Igor Andreoni^{11,13,14}, Tyler A. Pritchard¹¹, Jirong Mao^{15,16,17}, Mariusz Gromadzki¹⁸, and Jamison Burke^{1,2}

Ewolucja widma
 KN
 – od niebieskiego
 ku czerwonemu



BB
 fits



Przewidywania
modeli kilo-nowej

widmo czułe na
zawartość
lantanowców
i aktynowców

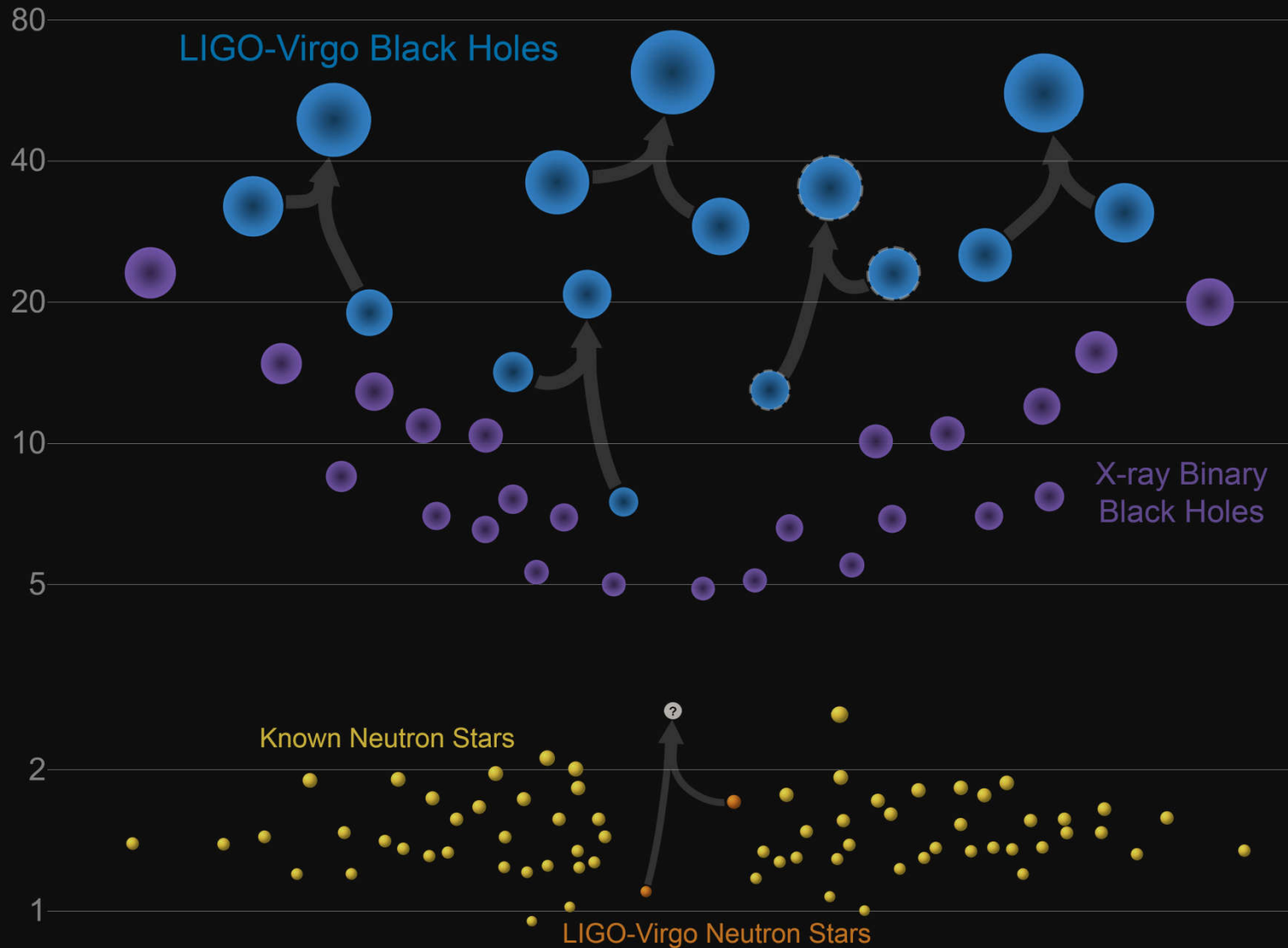
Table 1: Key Properties of GW170817

Property	Value	Reference
Chirp mass, $\mathcal{M}$ (rest frame)	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$	1
First NS mass, M_1	$1.36 - 1.60 M_{\odot}$ (90%, low spin prior)	1
Second NS mass, M_2	$1.17 - 1.36 M_{\odot}$ (90%, low spin prior)	1
Total binary mass, $M_{\text{tot}} = M_1 + M_2$	$\approx 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$	1
Observer angle relative to binary axis, θ_{obs}	$11 - 33^{\circ}$ (68.3%)	2
Blue KN ejecta ($A_{\text{max}} \lesssim 140$)	$\approx 0.01 - 0.02 M_{\odot}$	e.g., 3,4,5
Red KN ejecta ($A_{\text{max}} \gtrsim 140$)	$\approx 0.04 M_{\odot}$	e.g., 3,5,6
Light r -process yield ($A \lesssim 140$)	$\approx 0.05 - 0.06 M_{\odot}$	
Heavy r -process yield ($A \gtrsim 140$)	$\approx 0.01 M_{\odot}$	
Gold yield	$\sim 100 - 200 M_{\oplus}$	8
Uranium yield	$\sim 30 - 60 M_{\oplus}$	8
Kinetic energy of off-axis GRB jet	$10^{49} - 10^{50}$ erg	e.g., 9, 10, 11, 12
ISM density	$10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$	e.g., 9, 10, 11, 12

(1) [LIGO Scientific Collaboration et al. 2017c](#); (2) depends on Hubble Constant, [LIGO Scientific Collaboration et al. 2017d](#); (3) [Cowperthwaite et al. 2017](#); (4) [Nicholl et al. 2017](#); (5) [Kasen et al. 2017](#); (6) [Chornock et al. 2017](#); (8) assuming heavy r -process ($A > 140$) yields distributed as solar abundances ([Arnould et al., 2007](#)); (9) [Margutti et al. 2017](#); (10) [Troja et al. 2017](#); (11) [Fong et al. 2017](#); (12) [Hallinan et al. 2017](#)

Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



Einstein gravitational wave Telescope

Conceptual Design Study

Uniwersytet Śląski jest członkiem
Polskiego Konsorcjum
Teleskopu Einsteina



Co dalej?

Teleskop Einsteina

- Czulość przewyższająca LIGO II generacji
- Potężne katalogi zjawisk w skalach kosmologicznych
- Duże nadzieje
- Obecnie w fazie badań lokalizacyjnych
- Tysiące – setki tysięcy sygnałów grawitacyjnych od koalescencji NS-NS, NS-BH, BH-BH
- dziesiątki – setki z nich mogą ulec soczewkowaniu grawitacyjnemu

Speed of Gravitational Waves from Strongly Lensed Gravitational Waves and Electromagnetic Signals

Xi-Long Fan,^{1,2,*} Kai Liao,³ Marek Biesiada,^{4,5} Aleksandra Piórkowska-Kurpas,⁴ and Zong-Hong Zhu^{1,5,†}

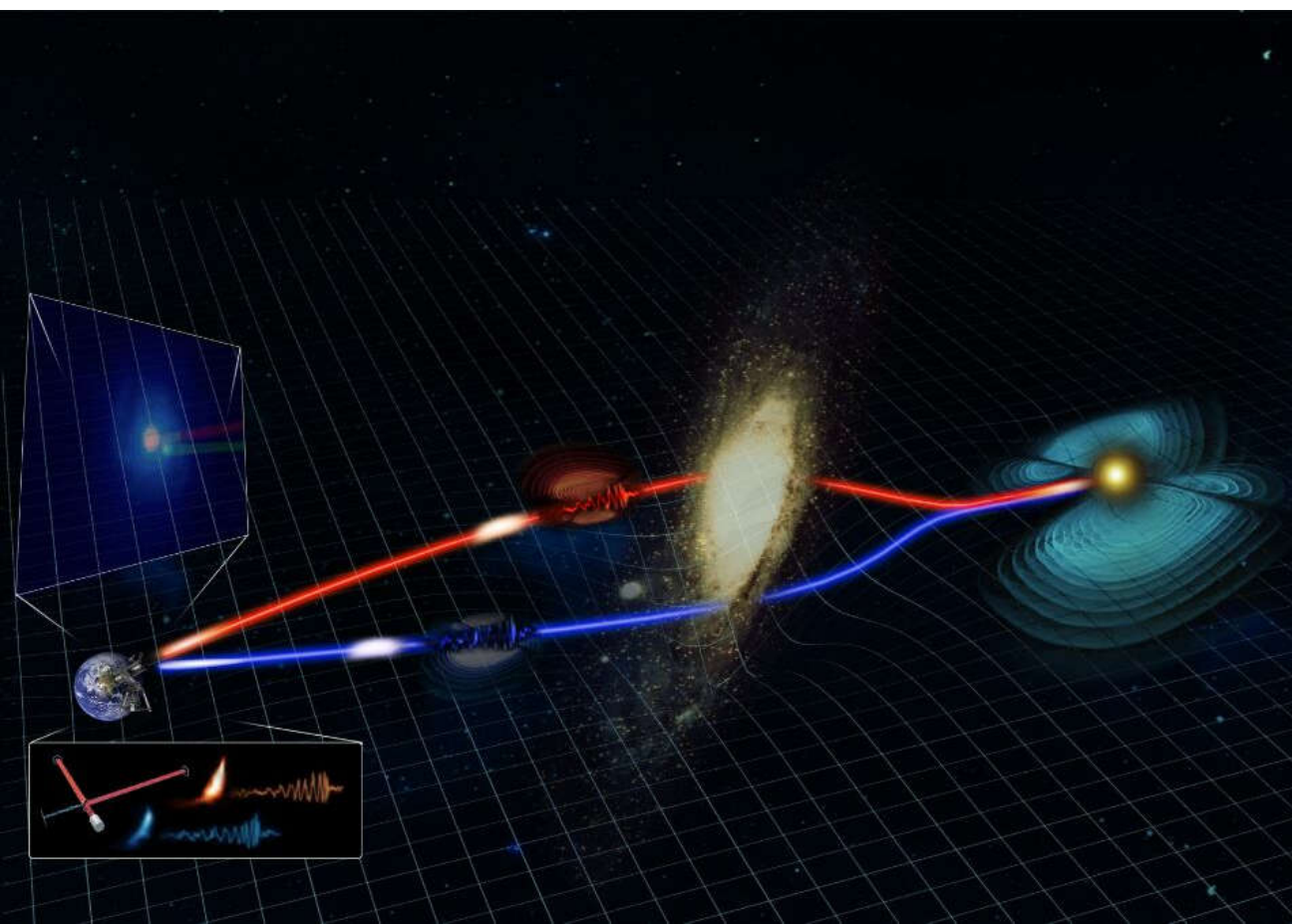
¹*School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China*

²*Departments of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China*

³*School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*

⁴*Department of Astrophysics and Cosmology, Institute of Physics, University of Silesia, Uniwersytecka 4, 40-007 Katowice, Poland*

⁵*Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*



Różnice w opóźnieniach
czasowych między
soczewkowanymi
obrazami (w EM i GW)
umożliwią
testowanie prędkości
propagacji
fal grawitacyjnych

ARTICLE

DOI: 10.1038/s41467-017-01152-9

OPEN

Precision cosmology from future lensed gravitational wave and electromagnetic signals

Kai Liao^{1,2}, Xi-Long Fan³, Xuheng Ding^{1,4,5}, Marek Biesiada^{4,6} & Zong-Hong Zhu^{1,4}

The standard siren approach of gravitational wave cosmology appeals to the direct luminosity distance estimation through the waveform signals from inspiralling double compact binaries, especially those with electromagnetic counterparts providing redshifts. It is limited by the calibration uncertainties in strain amplitude and relies on the fine details of the waveform. The Einstein telescope is expected to produce 10^4 – 10^5 gravitational wave detections per year, 50–100 of which will be lensed. Here, we report a waveform-independent strategy to achieve precise cosmography by combining the accurately measured time delays from strongly lensed gravitational wave signals with the images and redshifts observed in the electromagnetic domain. We demonstrate that just 10 such systems can provide a Hubble constant uncertainty of 0.68% for a flat lambda cold dark matter universe in the era of third-generation ground-based detectors.

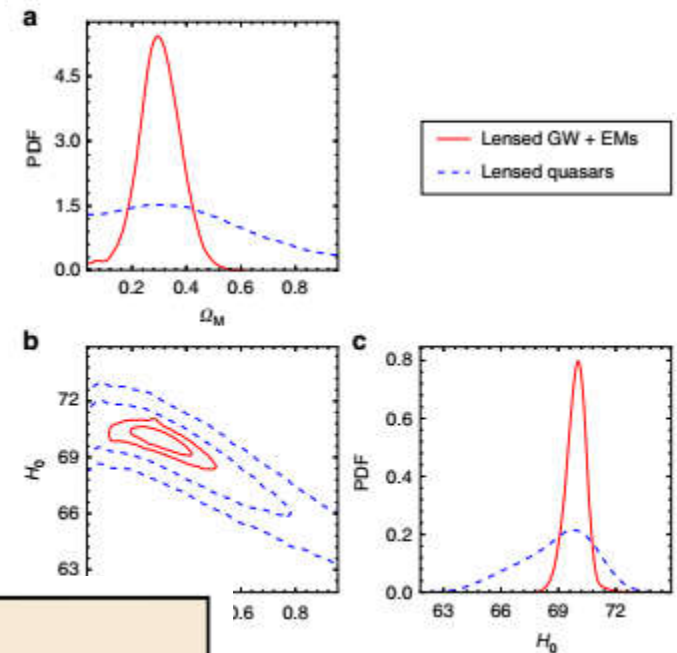
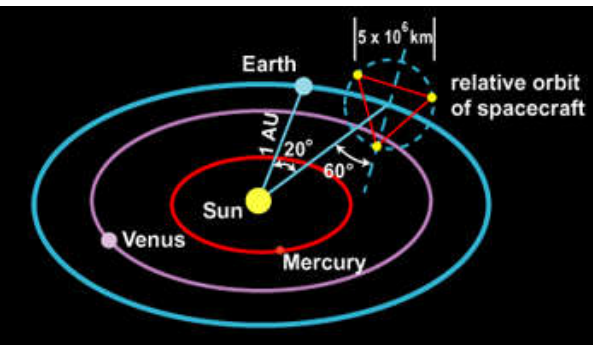


Table 2 The average constraining power of 10 lensed gravitational wave + electromagnetic systems

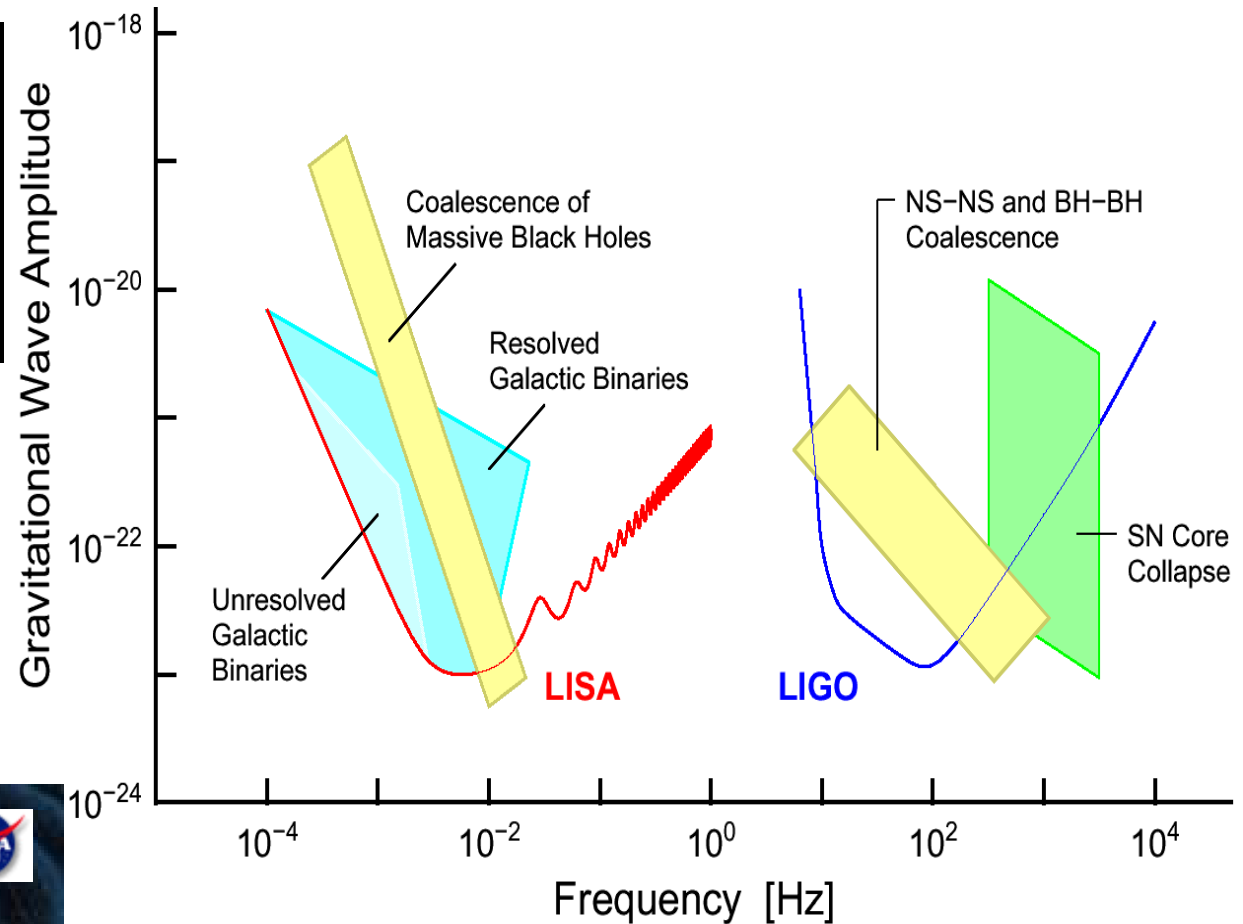
	Flat Λ CDM (Ω_M fixed)	Flat Λ CDM		Flat ω CDM			Open Λ CDM		
	H_0	H_0	Ω_M	H_0	Ω_M	w	H_0	Ω_M	Ω_k
Uncertainty	0.37%	0.68%	27%	2.2%	36%	25%	1%	38%	± 0.18

We compare cosmological parameters in different scenarios: flat lambda cold dark matter (Flat Λ CDM) with or without dimensionless matter density Ω_M fixed, flat ω CDM where the dark energy equation of state ω is a free parameter, and open Λ CDM where cosmic curvature Ω_k is a free parameter. For the same number of lensed quasars, the power is weaker by a factor of ~4 according to the uncertainty propagation using Eq. (1) and Table 1.

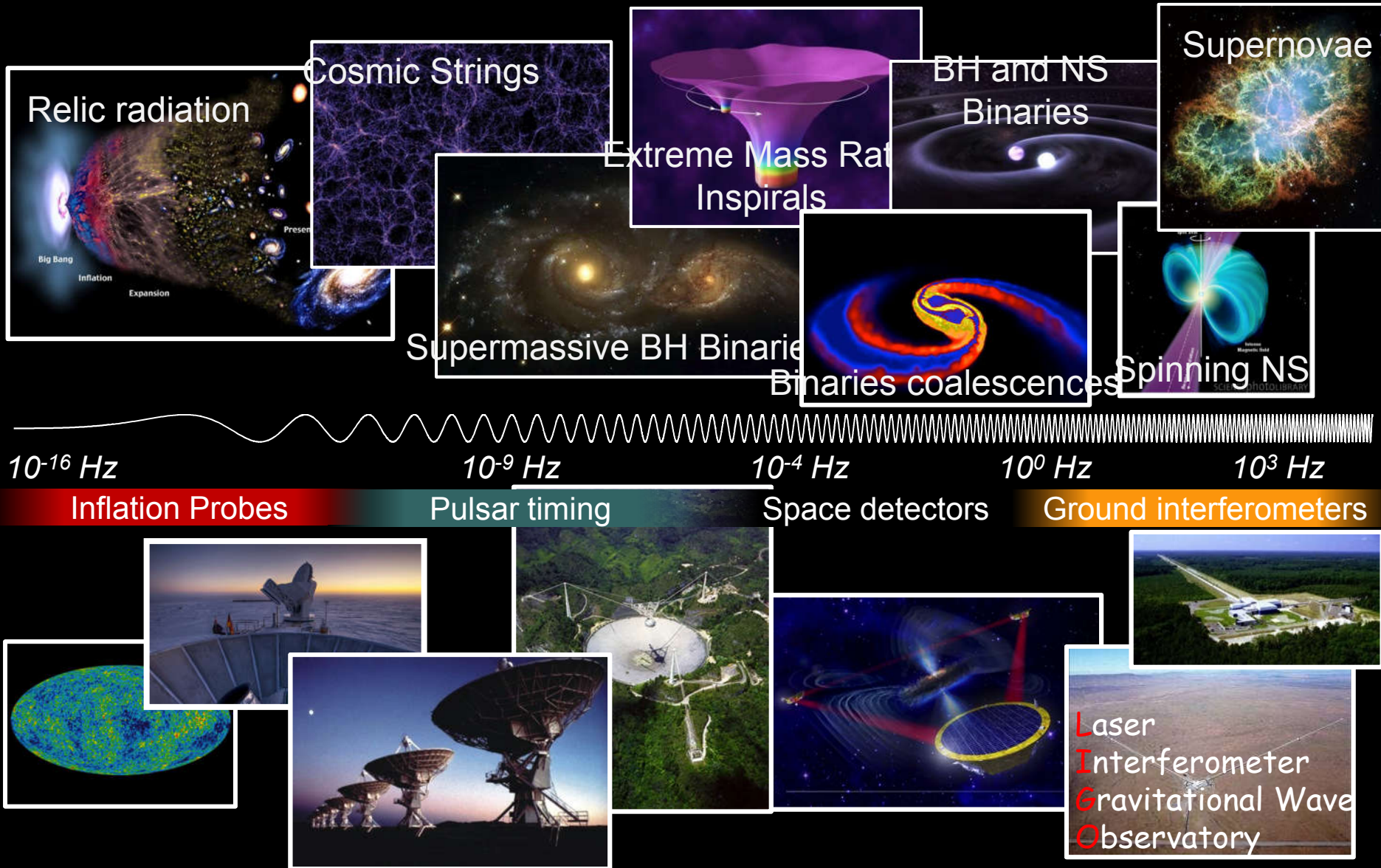
Detektory w przestrzeni kosmicznej LISA



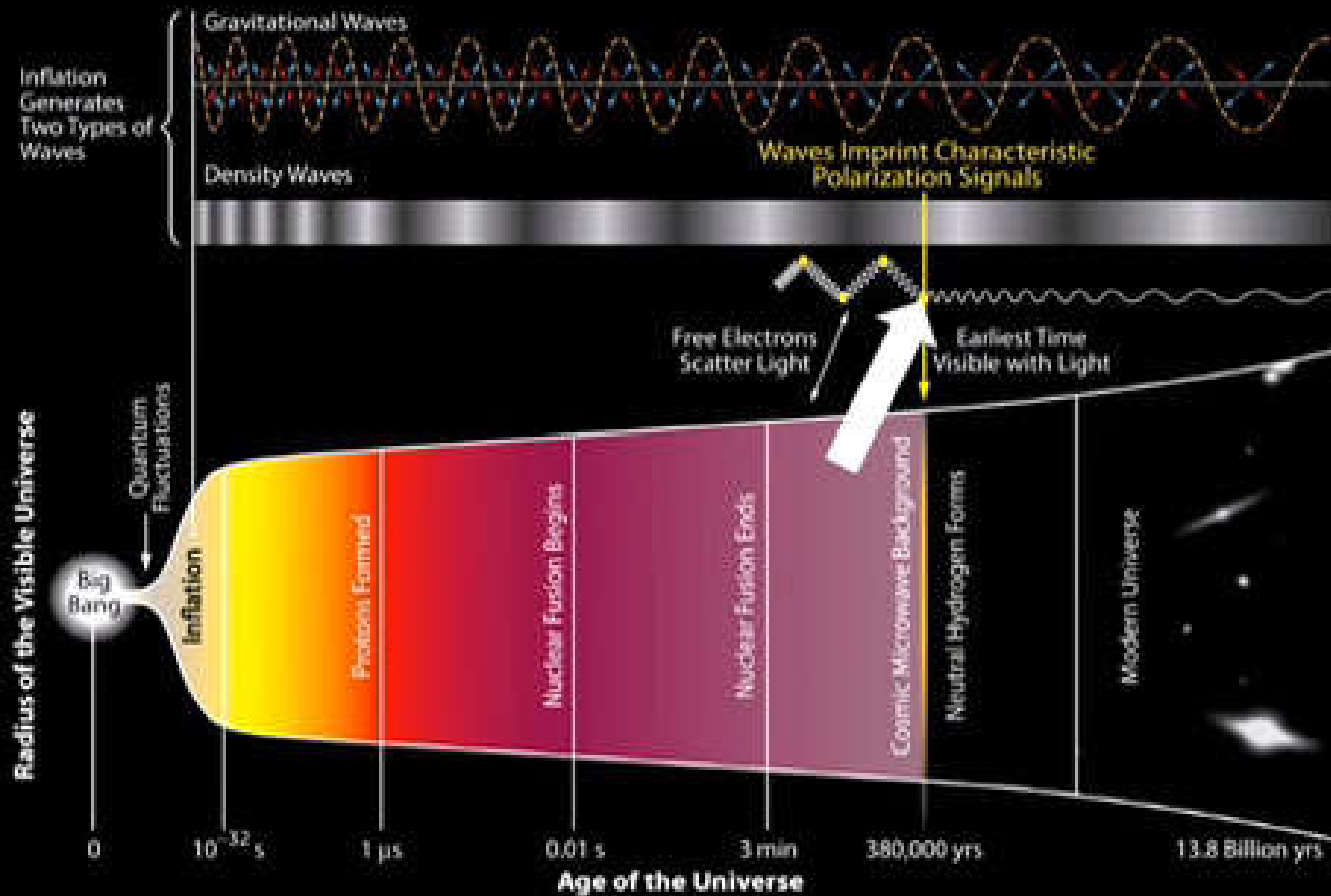
Projekt zatwierdzony
przez ESA
w czerwcu 2017



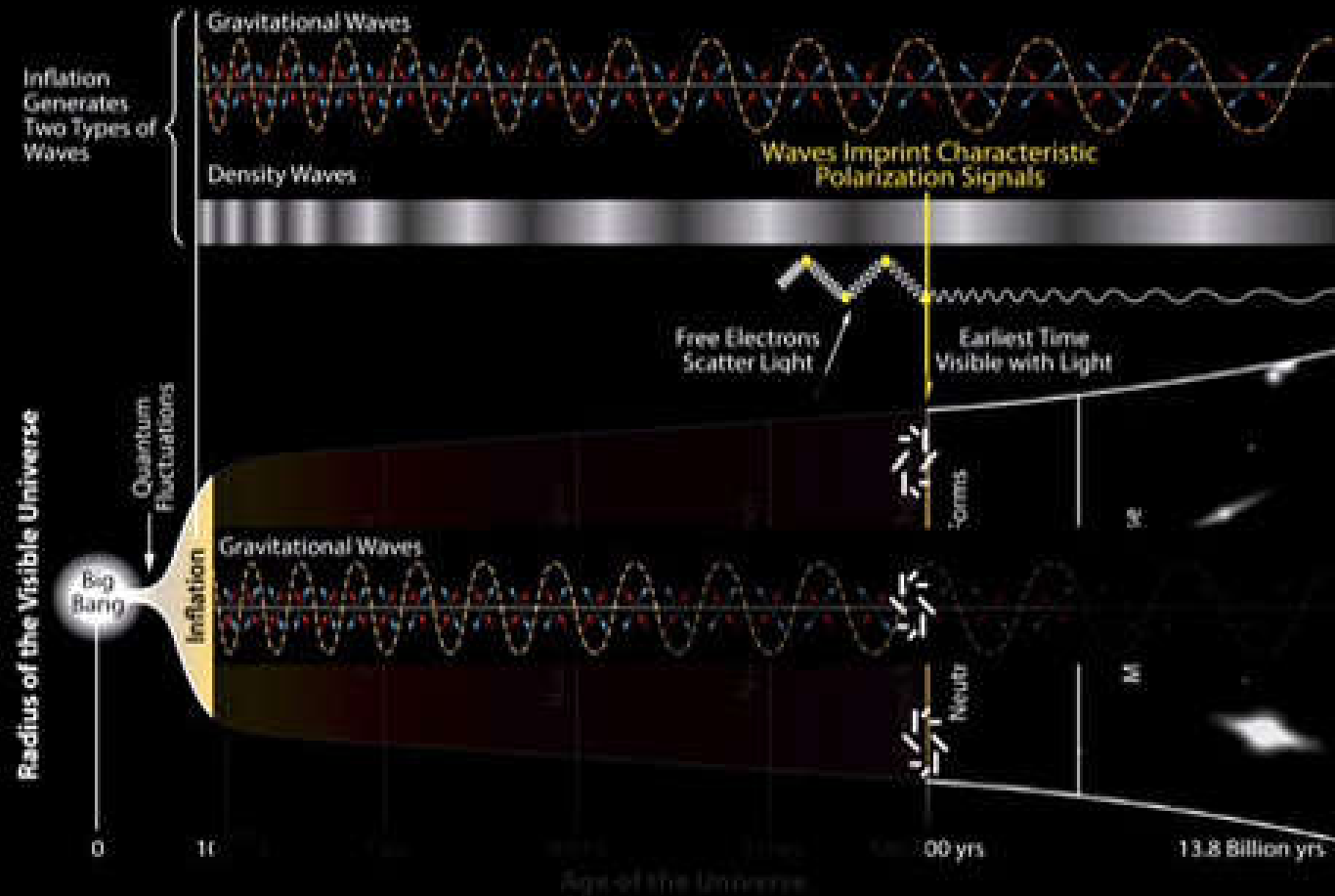
Źródła fal grawitacyjnych



History of the Universe



History of the Universe



Lead Proposer: Jacques Delabrouille

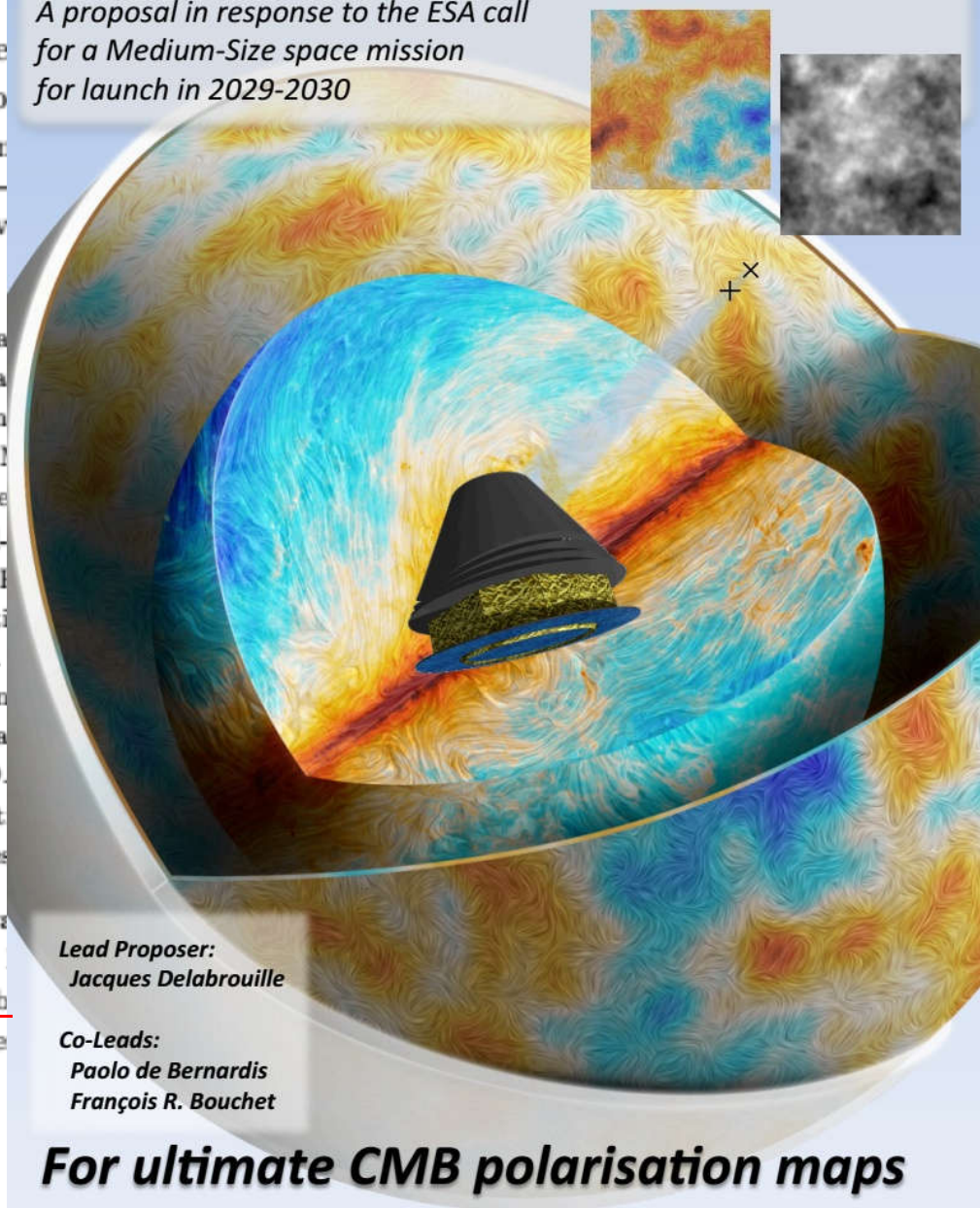
CNRS, Laboratoire APC, 10 Avenue Alice Domon et
tel.: +33157276040, fax: +33157276071, mail: delabrouille@cnam.fr
The Lead Proposer will support the study activities by providing

Proposal co-leads: Paolo de Bernardis (Sapienza Univ)
Proposers of the *CORE* space mission:

Austria: J. Alves; **Belgium:** C. Arina, E. Cortina, B. Crauss, B. Tytgat, B. Verknocke; **Denmark:** J. Ambjorn, P.H. Damgaard, E. Keihänen, H. Kurki-Suonio, J. Valiviita; **France:** M. Arnaud, Bernard, J. Bobin, F.R. Bouchet, F. Boulanger, M. Bucher, I. Charles, C. Combet, B. Comis, I. Debono, J. Delabrouille, Errard, S. Galli, K. Ganga, A. Ghribi, M. Giard, Y. Giraud, G. Lagache, G. Lavaux, A. Le Brun, H. Le Sueur, J. Macias-Perez, J.-B. Melin, M.-A. Miville-Deschênes, A. Monfardini, L. Montmerle, V. Poulin, G. Pratt, D. Prêle, S. Renaux-Petel, V. Revêret, I. Triqueneaux, M. Tristram, B. Van Tent, G. Vermeulen, F. Vernier, Brinckmann, G. Chon, S. Clesse, T. Ensslin, S. Grandis, S. Han, R. Sunyaev, J. Weller; **Ireland:** A. Murphy, C. O'Sullivan, D. Bartolo, P. Battaglia, E. Battistelli, M. Bersanelli, M. Biasotti, G. Castellano, F. Cavaliere, F. Cei, E. Coccia, S. Colafranceschi, R. van de Weygaert, J.P. van der Schaar, S. Zaroubi; **Norway:** I.K. Wehus; **Poland:** P. Bielewicz, M. Biesiada, M. Bliński, P. Orleński, W. Piechocki, A. Pollo, B. Roukema, R. Szczerbowski, C.J.A.P. Martins; **Spain:** E. Artal, R.B. Barreiro, E. Battaner

CORE The Cosmic Origins Explorer

*A proposal in response to the ESA call
for a Medium-Size space mission
for launch in 2029-2030*



Lead Proposer:
Jacques Delabrouille

Co-Leads:
Paolo de Bernardis
François R. Bouchet

For ultimate CMB polarisation maps

Otwarte zostało nowe okno na Wszechświat -
możemy oczekiwać wielu nowych odkryć
i fascynującej przygody poznawczej