

Wykrycie fal grawitacyjnych

Andrzej Królak



Plan seminarium

1. Czym są fale grawitacyjne?
2. Próby detekcji fal grawitacyjnych
3. Rejestracja fali grawitacyjnej z układu podwójnego czarnych dziur przez detektory LIGO
4. Analiza sygnału przez konsorcjum LIGO-Virgo
5. Udział polskiej grupy Virgo-POLGRAW
6. Wnioski

Co to są fale grawitacyjne?

Metryka

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

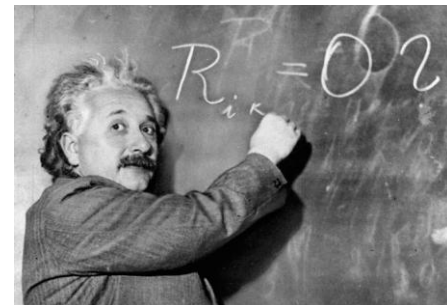
Równania Einsteina

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



Linearyzacja

$$\Delta \bar{h}_{\mu\nu} = \frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



$$\Delta = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$$

Moment kwadrupolowy

$$h_{ij}(t) = \frac{2G}{c^4 r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} I_{ij} \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

Wzór kwadrupolowy

$$L = \frac{G}{5c^5} \left\langle \frac{\partial^3}{\partial t^3} I_{ij} \frac{\partial^3}{\partial t^3} I^{ij} \right\rangle$$

$$G/c^4 = 8,3 \cdot 10^{-50} \quad [\text{s}^2/(\text{kg m})]$$

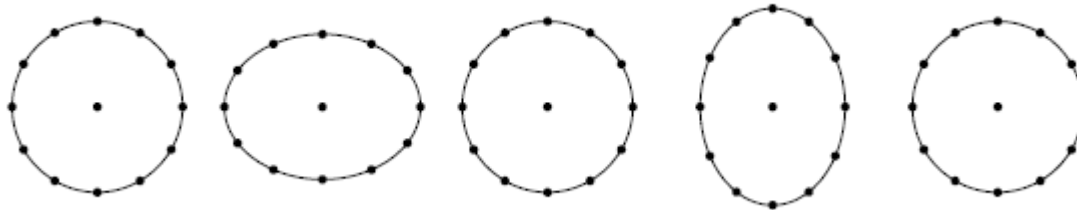
Własności fal grawitacyjnych

Propagują się z prędkością światła

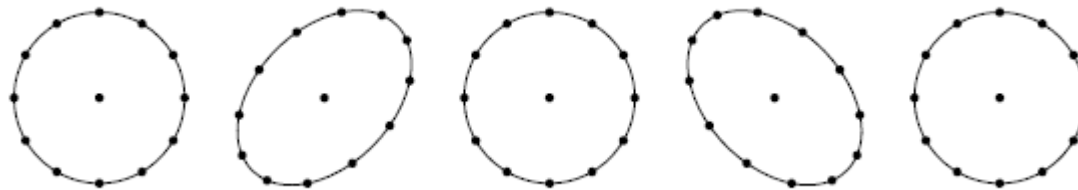
Dwie polaryzacje

$$h_{\mu\nu}^{\text{TT}}(t, \mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+(t, \mathbf{x}) & h_\times(t, \mathbf{x}) & 0 \\ 0 & h_\times(t, \mathbf{x}) & -h_+(t, \mathbf{x}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

PLUS



CROSS



Fale grawitacyjne w OTW

„Wielka czwórka”: H. Bondi, F. Pirani, R. Sachs, A. Trautman wykazała (przełom lat 50 i 60), że równania Einsteina dopuszczają zjawisko promieniowania grawitacyjnego.

Istotną rolę w zrozumieniu promieniowania grawitacyjnego i metod ich wykrycia odegrały dyskusje na konferencji w Chapel Hill, 18-23 January 1957 (**GR1**).

Pirani: *“By measurements of the relative accelerations of several different pairs of particles, one may obtain full details about the Riemann tensor. One can thus very easily imagine an experiment for measuring the physical components of the Riemann tensor”.*

Pirani, F.A.E.: *On the physical significance of the Riemann tensor*. Acta Phys. Polon. 15, 389 (1956)

Pośrednie potwierdzenie istnienia fal grawitacyjnych (układy podwójne !)

$$Mc = 0.30 Ms \quad f_{gw} = 3.8 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

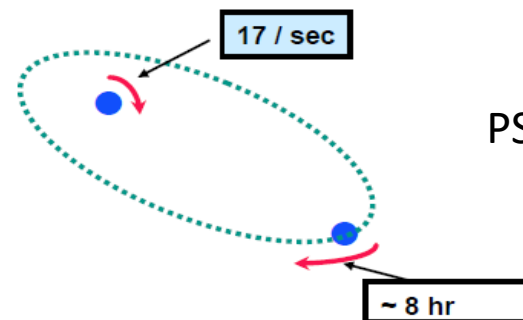
$$\tau_{gw} = 2.0 \times 10^8 \text{ yr}$$



Paczyński
1967

$$Mc = 1.2 Ms \quad f_{gw} = 7.1 \times 10^{-5} \text{ Hz}$$

$$\tau_{gw} = 1.6 \times 10^9 \text{ yr}$$

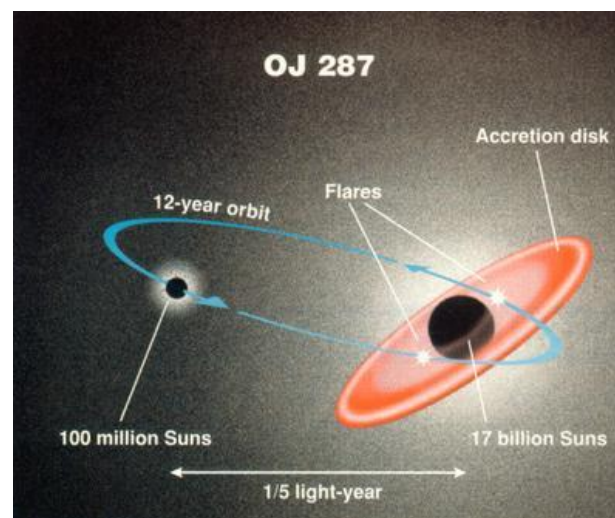


PSR1913+16

Hulse i Taylor
1974

$$Mc = 7.8 \times 10^8 Ms \quad f_{gw} = 5.2 \times 10^{-9} \text{ Hz}$$

$$\tau_{gw} = 3.7 \times 10^5 \text{ yr}$$



Valtonen et al.
2007

Pierwsze eksperymentalne próby bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych: Joseph Weber (1919-2000), lata 60-te XX wieku.



1969: doniesienie o odkryciu fal grawitacyjnych, nie potwierdzone.

Idea budowy detektorów interferometrycznych: lata 60-te i 70-te XX wieku.

Detektory interferometryczne 1szej generacji: 2002-2011.

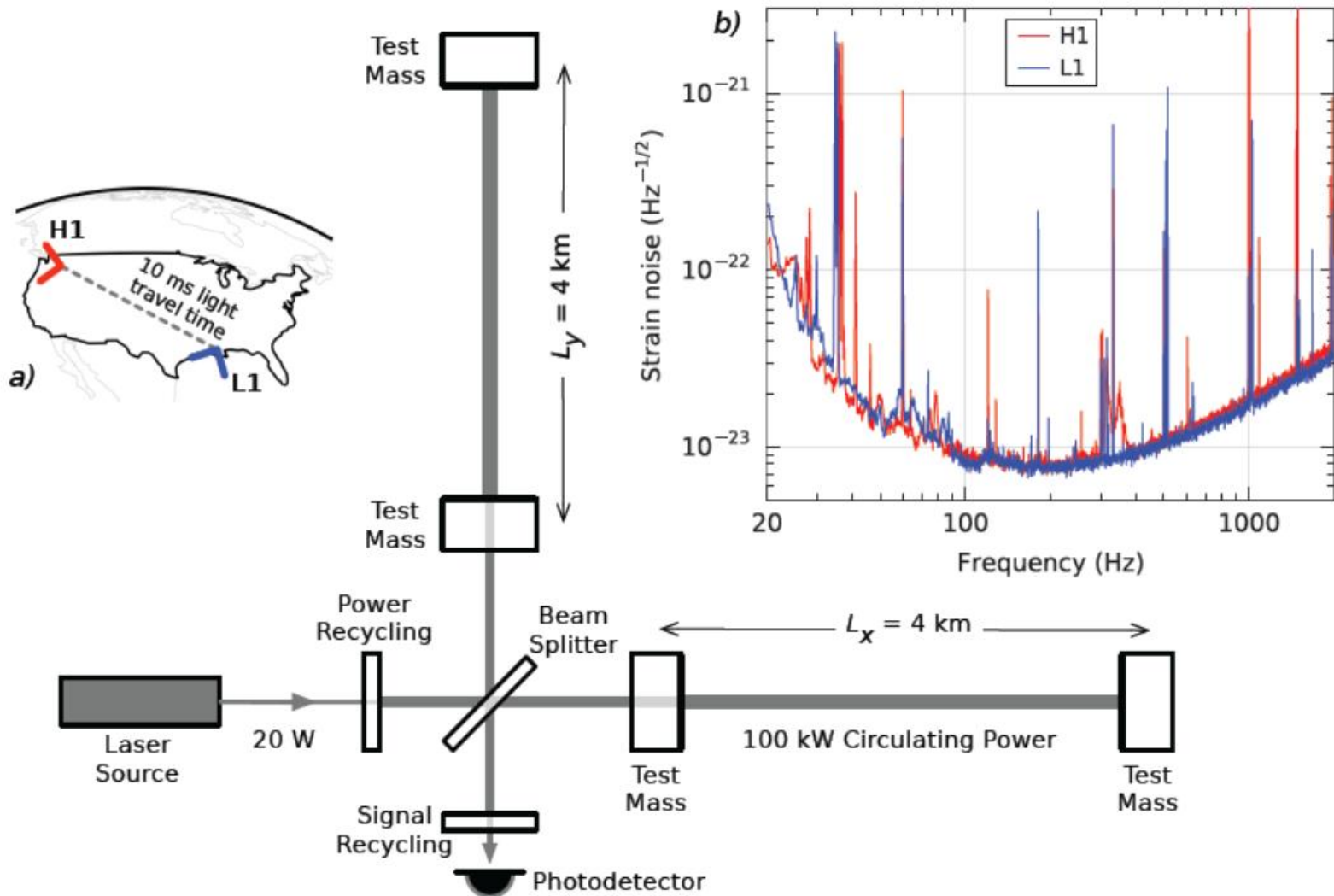
Detektory interferometryczne 2giej generacji: od 2015.

Jak doszło do detekcji sygnału?

- 2014: Początek sezonu obserwacyjnego **LIGO** ustalony na 14.09.2015 .
- 10.09: początek przesunięty na 18.09 (dodawanie sztucznych sygnałów nie gotowe) .
- 11.09: Detektory pozostawione w modzie obserwacyjnym .
- 14.09: 12:55 wiadomość od Marco Drago - „Hi all, cWB has put on gracedb a very interesting event in the last hour” .

Fala grawitacyjna zarejestrowana: 14.09.2015, 09.50.45 UTC

Detektory LIGO



Detektory LIGO

Hanford

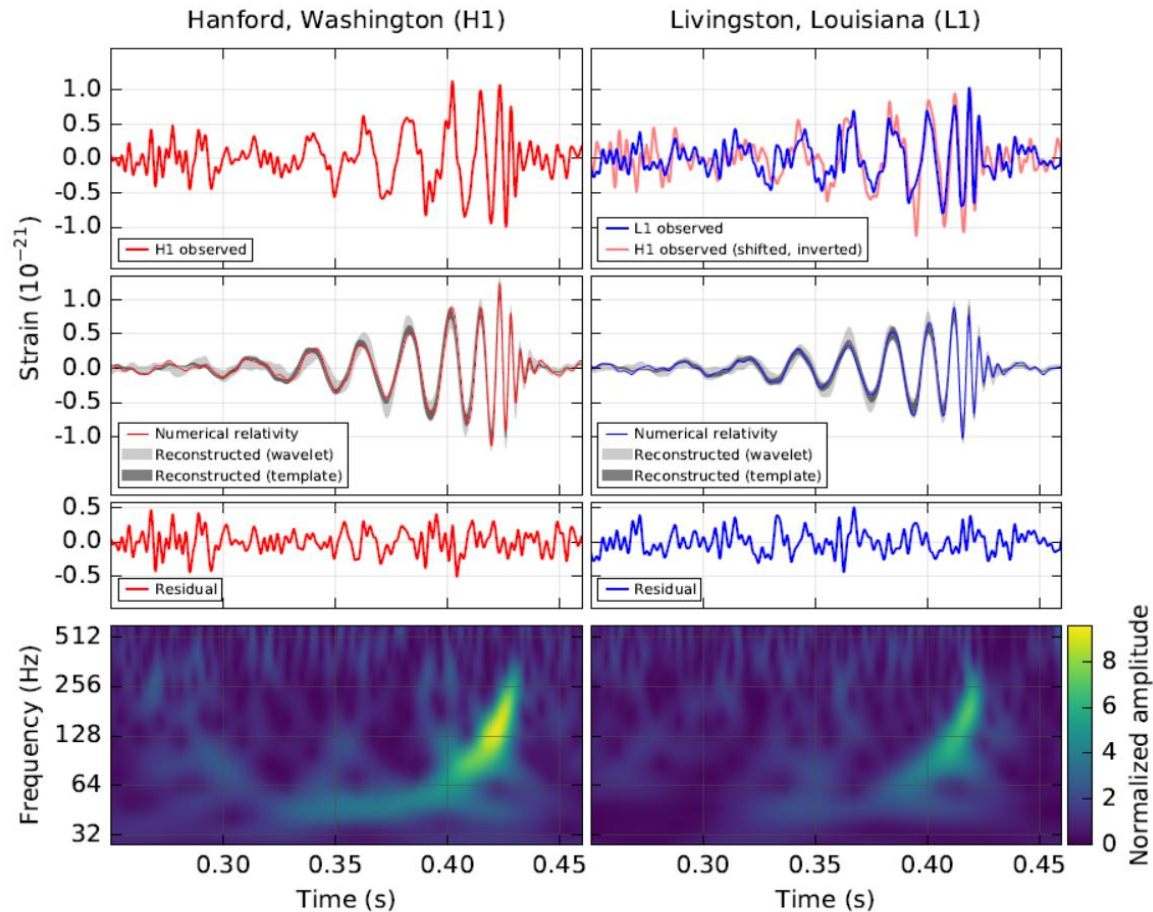


Livingstone



Sygnał: fala grawitacyjna z układu podwójnego czarnych dziur

GW150914



Parametry sygnału

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

Dwa odkrycia

1. Po raz pierwszy zarejestrowano na Ziemi sygnał fali grawitacyjnej
2. Po raz pierwszy zaobserwowano zlewający się układ podwójny czarnych dziur i powstanie nowej czarnej dziury.

GW from a binary system

Masa ćwierku

$$M_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

$$h_{CB} = 1.0 \times 10^{-21} \left(\frac{M_c}{31.6 \text{ Ms}} \right)^{5/3} \left(\frac{f_{GW}}{100 \text{ Hz}} \right)^{2/3} \left(\frac{410 \text{ Mpc}}{r} \right)$$

Charakterystyczny
czas ewolucji układu

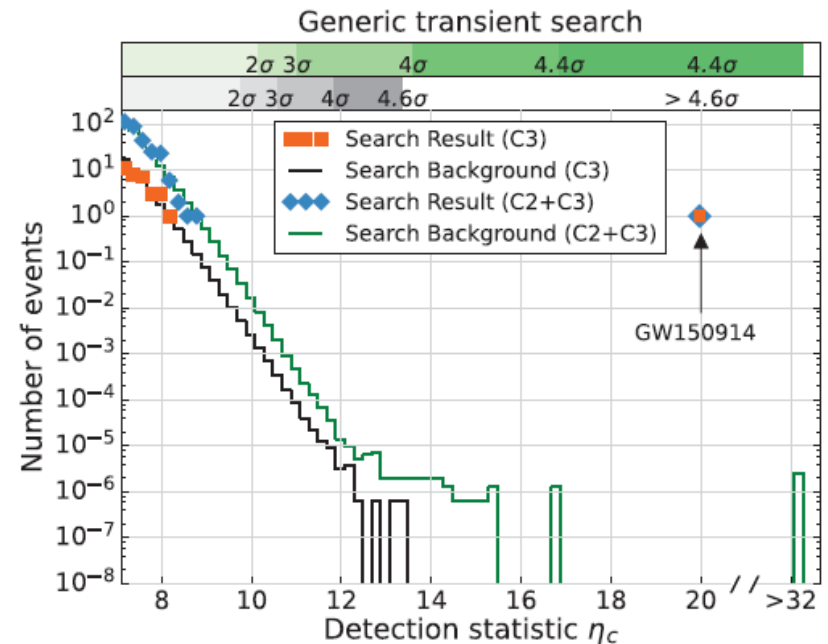
$$\tau_{GW} = 46.8 \text{ ms} \left(\frac{M_c}{31.6 \text{ Ms}} \right)^{-5/3} \left(\frac{f_{GW}}{100 \text{ Hz}} \right)^{-8/3}$$

Transformata Fouriera

$$\bar{h}_{CB} = 1.4 \times 10^{-23} \left(\frac{M_c}{31.6 \text{ Ms}} \right)^{5/6} \left(\frac{f_{GW}}{100 \text{ Hz}} \right)^{-7/6} \left(\frac{410 \text{ Mpc}}{r} \right)$$

Analiza danych: wykrycie

- GW150914 wykryty kodem cWB w czasie rzeczywistym: analiza czasowo-częstotliwościowa (transformata falkowa) do identyfikacji kandydatów, rekonstrukcja metodą największej wiarygodności.



Statystyczne znaczenie sygnału otrzymane metodą przesunięć danych o $\simeq 10$ ms
 1.6×10^6 niezależnych realizacji szumu

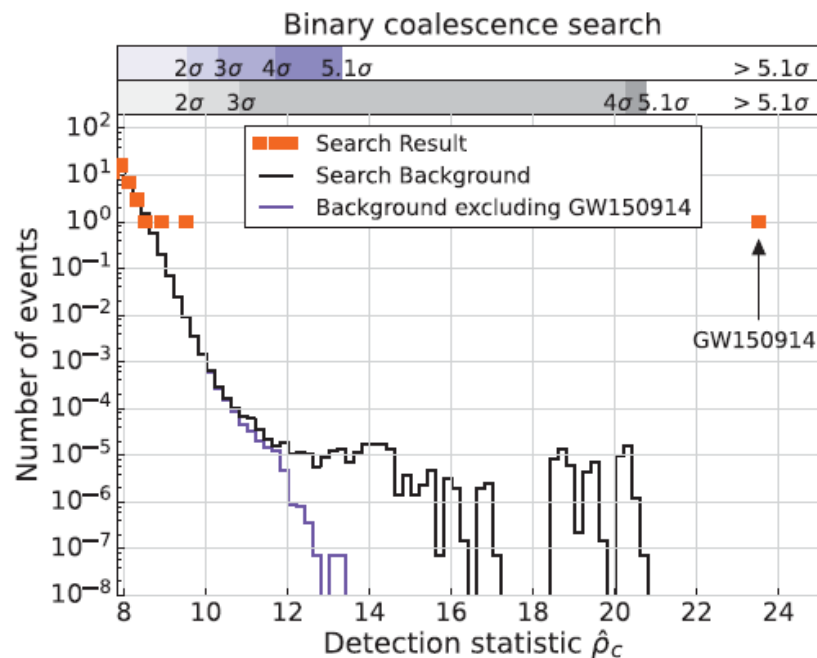
Analiza danych: potwierdzenie

GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO (<http://arxiv.org/abs/1602.03839>)

- Kody PyCBC: filtr dopasowany - podejście jednociągowe, wzorce z poprawkami post-newtonowskimi 3.5PN zszyte z modelami numerycznymi.

$$\rho^2(t) \equiv \frac{1}{\langle h|h \rangle} [\langle s|h_c \rangle^2(t) + \langle s|h_s \rangle^2(t)]$$

- Kody GstLAL: potwierdzenie PyCBC niezależną metodą – szybka konstrukcja wzorców metoda SVD.



**Prawdopodobieństwo
fałszywego alarmu
< 1 zdarzenie na 203000 lat**

Estymacja parametrów

Properties of the binary black hole merger GW150914 (<http://arxiv.org/abs/1602.03840>)

Rozkład a posteriori – metoda Bayesa

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta)p(y|\theta)}{p(y)} \propto p(\theta)p(y|\theta)$$

Rozkład wyliczany metodami MCMC i „nested sampling”

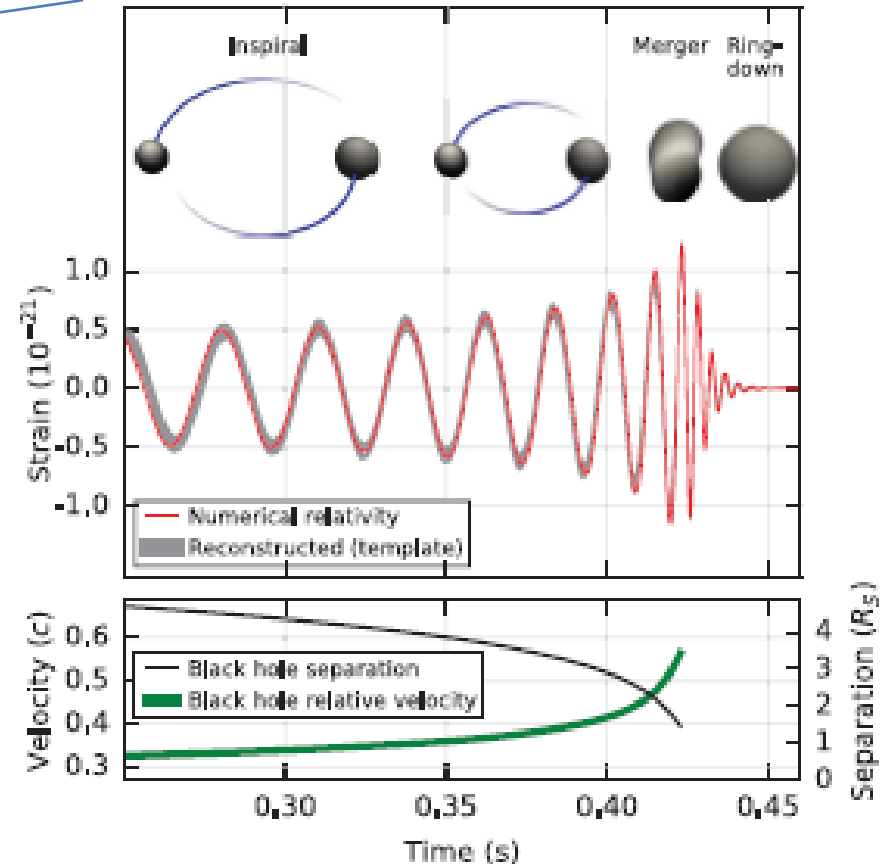
Wzorce oparte na przybliżeniach PN, modele numeryczne, efektywne przybliżenie jednociątowe (EOB) uwzględniające spiny

Spiny $a_1 < 0.7$, $a_2 < 0.9$

Spin końcowy $a = 0.7$

Sygnal zgodny z dwoma czarnymi dziurami Kerra zlewającymi się w jedną czarną dziurę

Iloraz wiarygodności



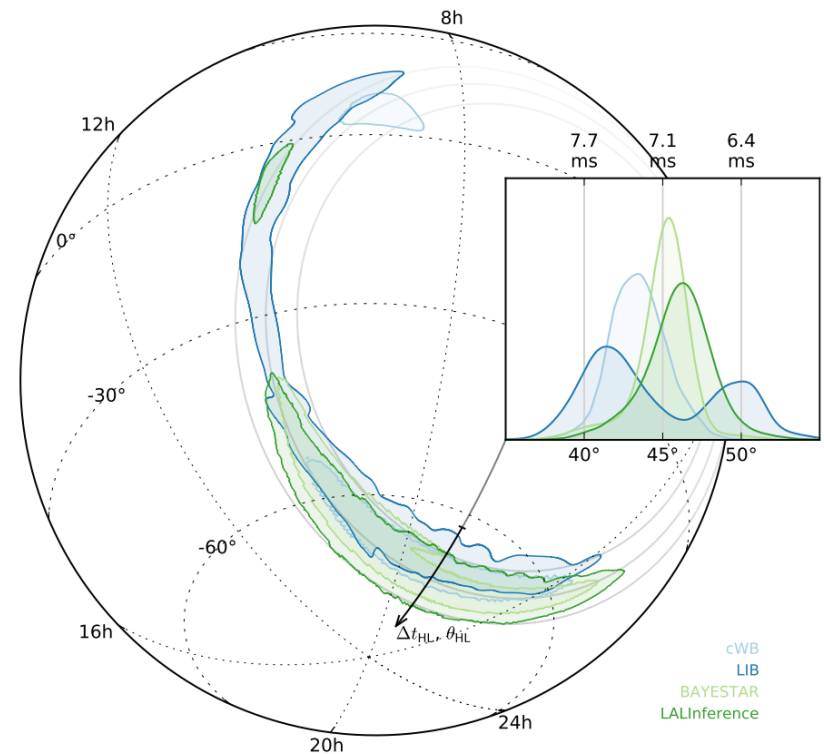
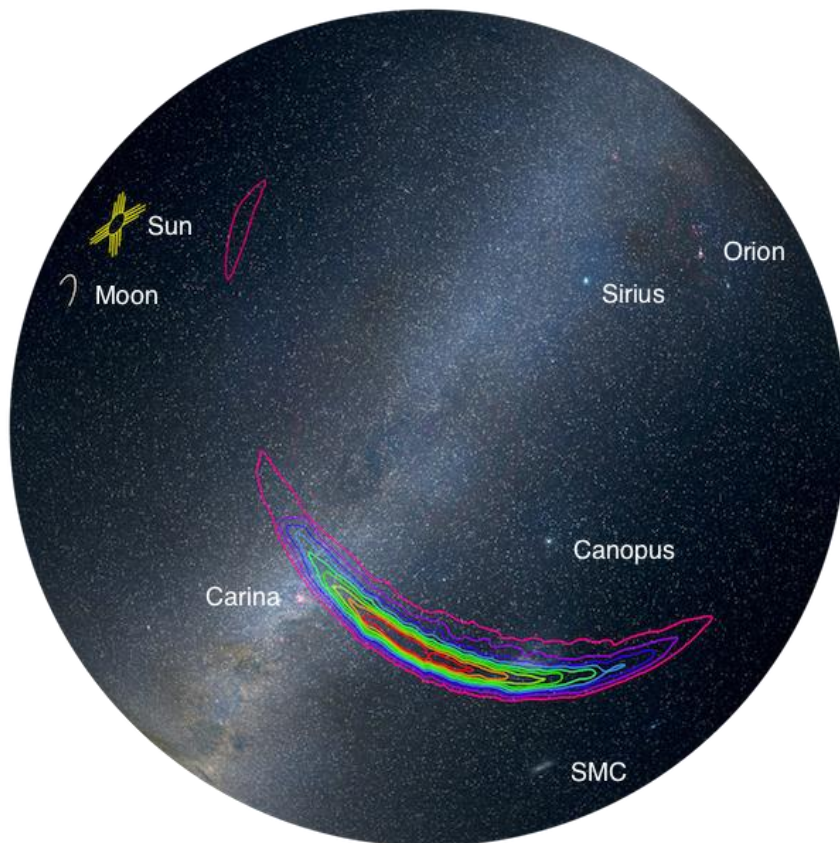
$a < 1$ czarna dziura
 $a \geq 1$ „goła” osobliwość

Lokalizacja źródła

Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions

(<http://arxiv.org/abs/1602.03843>)

4 niezależne kody wyznaczyły położenie źródła: cWB, LIB, BAYESTAR, i LALInference



Oczekiwana liczba złań BBH

THE RATE OF BINARY BLACK HOLE MERGERS INFERRED FROM ADVANCED LIGO OBSERVATIONS SURROUNDING GW150914 (<http://arxiv.org/abs/1602.03842>)

Event	Time (UTC)	FAR (yr^{-1})	$\mathcal{F}$	$\mathcal{M}$ ($M_{\odot}$)	m_1 ($M_{\odot}$)	m_2 ($M_{\odot}$)	χ_{eff}	D_L (Mpc)
GW150914	14 September 2015 09:50:45	$< 5 \times 10^{-6}$	$< 2 \times 10^{-7}$ ($> 5.1 \sigma$)	28^{+2}_{-2}	36^{+5}_{-4}	29^{+4}_{-4}	$-0.06^{+0.17}_{-0.18}$	410^{+160}_{-180}
LVT151012	12 October 2015 09:54:43	0.44	0.02 (2.1σ)	15^{+1}_{-1}	23^{+18}_{-5}	13^{+4}_{-5}	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$	1100^{+500}_{-500}

Symulacje

Liczba złań = 0.1 – 300 Gpc -3 yr -1

GW150914

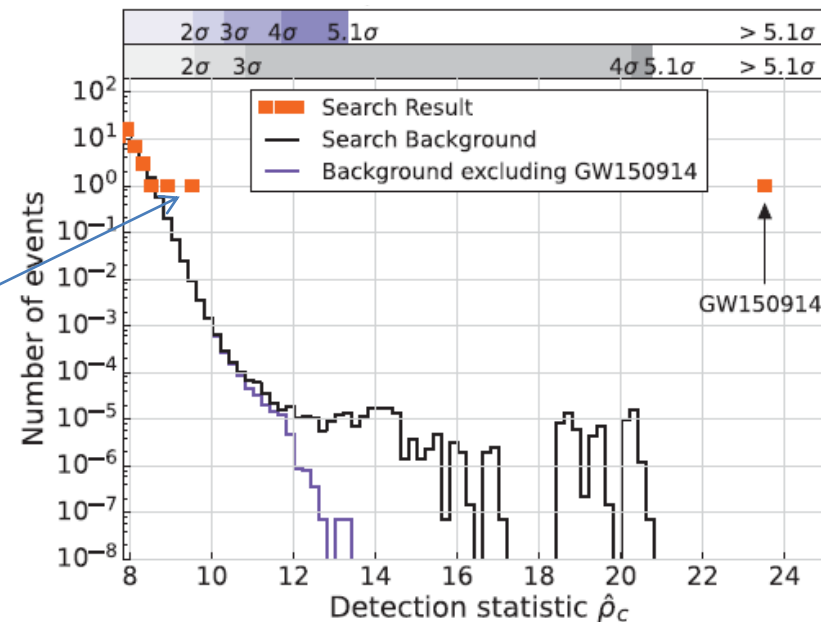
Wszystkie BBH takie same

Liczba złań = 2 – 53 Gpc-3 yr -1

GW150914 LVT151012

Liczba złań = 6 – 400 Gpc -3 yr -1

(Oceny otrzymane metodą ananlizy populacji podwójnych gw. neutronowych)



Astrofizyczna interpretacja

LSC-Virgo, [ASTROPHYSICAL IMPLICATIONS OF THE BINARY BLACK-HOLE MERGER GW150914](http://arxiv.org/abs/1602.03846), ApJL, 818, L22, 2016 (<http://arxiv.org/abs/1602.03846>)

**Czarne dziury GW150914 bardziej masywne niż znane czarne dziury
Dowód na istnienie „ciężkich” ($> 25M_{\odot}$) gwiazdowych czarnych dziur**

Powstanie układu podwójnego czarnych dziur GW150914

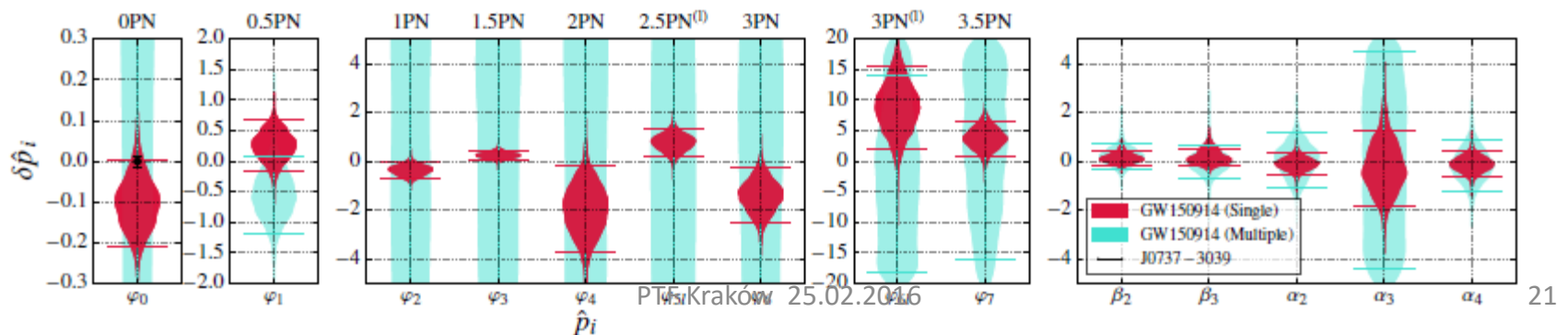
1. W polu galaktyki w otoczeniu niskiej metaliczności:
 $< \frac{1}{2} Z_{\odot}$, $< \frac{1}{4} Z_{\odot}$.

2. W gromadach o metaliczności $< Z_{\odot}$,
złanie poza gromadą po jego opuszczeniu.

Testy OTW

LSC-Virgo, [Tests of general relativity with GW150914 \(http://arxiv.org/abs/1602.03841\)](http://arxiv.org/abs/1602.03841)

- Wartości resztkowe (dane – modele sygnału) zgodne z szumem detektora.
- Masy i spiny końcowej czarnej dziury przewidziane z fazy zbliżania zgodne z masami i spinami estymowanymi z fazy złania i drgań normalnych.
- Estymacja współczynników PN zgodna z przewidywaniami OTW.
- Dolne ograniczenie na Comptonowską długość fali grawitonu = 10^{13} km
- NIE można wykluczyć innych niż te w OTW, polaryzacji FG.



Koincydencje z obserwacjami EM

W programie koincydencji uczestniczy 65 obserwatoriów astronomicznych.

G184098 -> GW150914 śledziło 25 zespołów, w tym polski Pi-of-the-Sky.

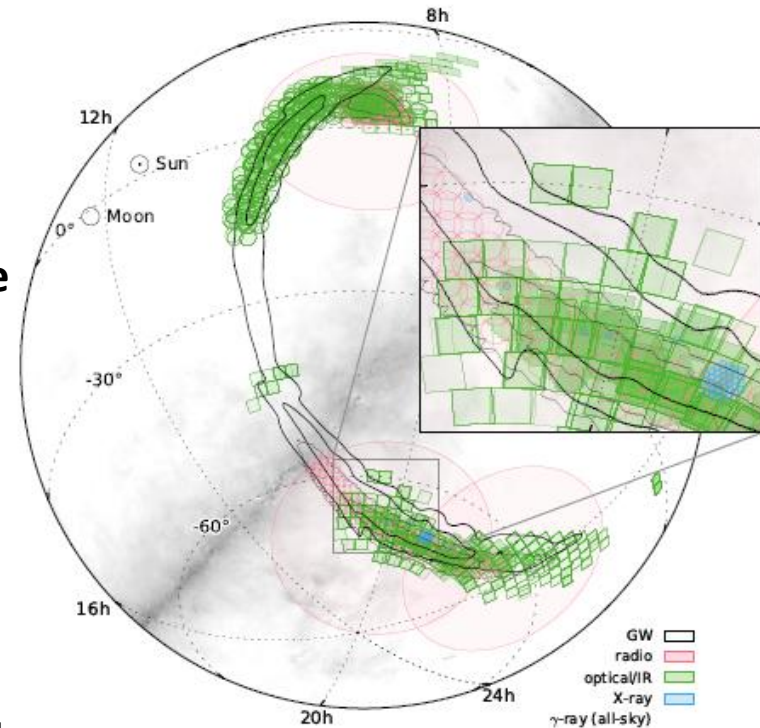
Alert wysłany 2 dni po detekcji (w przyszłości po 10 minutach)

W standardowym scenariuszu nie oczekujemy promieniowania EM.

Szczegółowe wyniki w pracach partnerów.

„weak transient source above 50 keV, 0.4 s after the GW event detected” !?

- **High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube** (<http://arxiv.org/abs/1602.05411>)
- **Swift follow-up of the Gravitational Wave source GW150914** (<http://arxiv.org/abs/1602.03868>)
- **Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914** <http://arxiv.org/abs/1602.03920>
- Pan-STARRS and PESSTO search for the optical counterpart to the LIGO gravitational wave source GW150914 (<http://arxiv.org/abs/1602.04156>)
- INTEGRAL upper limits on gamma-ray emission associated with the gravitational wave event GW150914 (<http://arxiv.org/abs/1602.03841>)
- Fermi-LAT Observations of the LIGO event GW150914 <http://arxiv.org/abs/1602.04488>

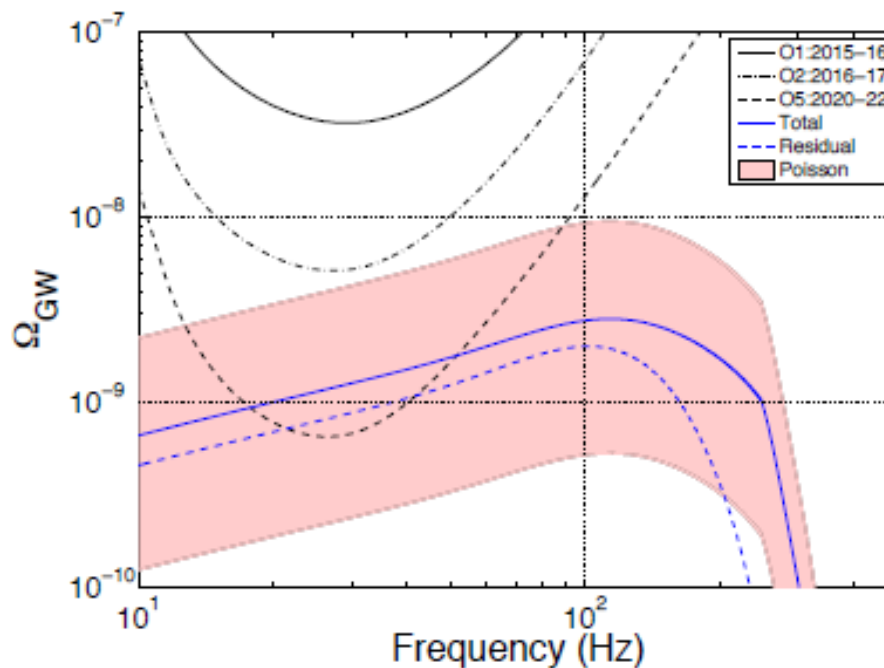


Tło stochastyczne BBH

GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes

(przyjęta do PRL <http://arxiv.org/abs/1602.03847>)

- Masa układu czarnych dziur GW150914 większa niż oczekiwano.
- Stąd tło stochastyczne superpozycji sygnałów FG z tych układów podwójnych na tle duże, że może być wykrywalne, kiedy detektory osiągną swoją maksymalną zaplanowaną czułość.



$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{f}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{df}$$

Inne prace

- **GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries**

(przyjęta do PRL, <http://arxiv.org/abs/1602.03838>) – opis detektora, czułość będzie zwiększona jeszcze 3x .

- **Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914**

(<http://arxiv.org/abs/1602.03844>) - analiza szumu, środowisko i zakłócenia w detektorze wykluczone jako źródło sygnału GW150914.

- **Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914**

(<http://arxiv.org/abs/1602.03845>), wolty $\rightarrow$ h.

Dane (4096 sekund) z detektorów LIGO, w których jest sygnał:

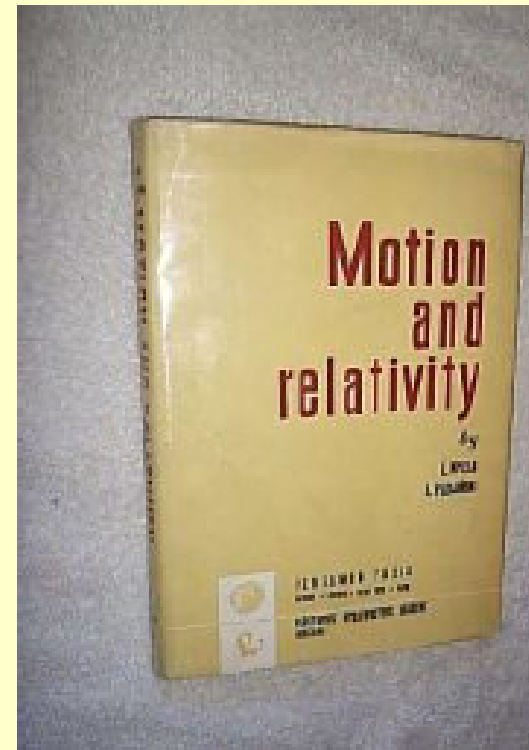
LIGO Open Science Center (with access to GW150914 data):

<https://losc.ligo.org/about/>

Polski wkład w badania nad falami grawitacyjnymi

Problem ruchu i promieniowania w ogólnej teorii względności

- **M.Mathisson** (1931-1937).
- Równania Einsteina-**Infelda**-Hoffmanna (1938).
- Warszawska szkoła fizyki relatywistycznej (**L.Infeld**, **J.Plebański**, **S.Bażański**, **R.Michalska-Trautman**, **W.Tulczyjew**); **L.Infeld**, **J.Plebański**, monografia *Motion and Relativity* (1960).
- Ścisłe rozwiązania równań Einsteina opisujące sferyczne fale grawitacyjne: **I.Robinson**, **A.Trautman** (1960).



Konsorcjum LIGO-Virgo

- LIGO i Virgo podpisały porozumienie o współpracy w 2007 roku
- Od tego momentu oba projekty dzielą się danymi z interferometrów i wspólnie analizują dane
- Bliska współpraca LSC-Virgo umożliwiła stworzenie globalnej sieci detektorów fal grawitacyjnych:
 - LIGO
 - LIGO Hanford (długość ramion 4km)
 - LIGO Livingston (długość ramion 4km)
 - Virgo (długość ramion 3km)

Konsorcjum liczy ok. 1300 osób



ADVANCED VIRGO

- ❑ Advanced Virgo (AdV): upgrade of the Virgo interferometric detector of gravitational waves
- ❑ Participated by scientists from Italy and France (former founders of Virgo), The Netherlands, Poland and Hungary
- ❑ Funding for investments approved in Dec 2009
- ❑ Construction in progress. End of installation: fall 2015
- ❑ Plan: first science data in 2016

5 European countries
19 labs, ~200 authors

APC Paris
ARTEMIS Nice
EGO Cascina
INFN Firenze-Urbino
INFN Genova
INFN Napoli
INFN Perugia
INFN Pisa
INFN Roma La Sapienza
INFN Roma Tor Vergata
INFN Trento-Padova
LAL Orsay - ESPCI Paris
LAPP Annecy
LKB Paris
LMA Lyon
NIKHEF Amsterdam
POLGRAW(Poland)
Radboud Uni. Nijmegen
RMKI Budapest



Udział polskiego zespołu Virgo- POLGRAW

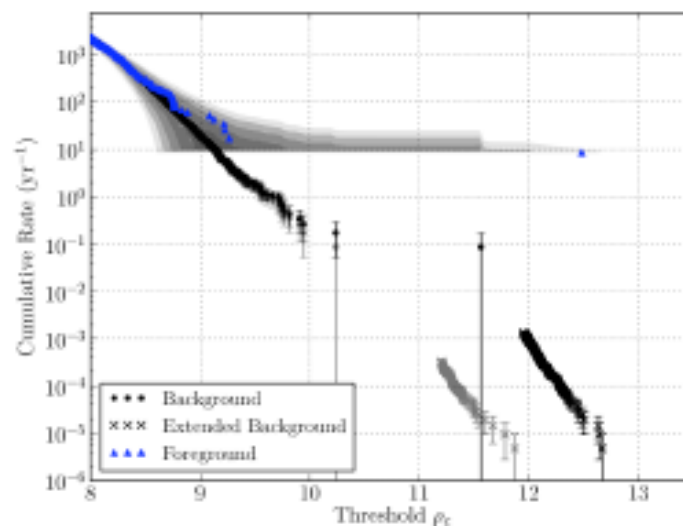
- ★ Podstawy algorytmów i metod służących do wykrywania i estymacji parametrów fal grawitacyjnych z układów podwójnych (**Andrzej Królak, Piotr Jaranowski**)
- ★ Modelowanie sygnału fali grawitacyjnej z układu podwójnego (**Piotr Jaranowski, Andrzej Królak**)
- ★ Przewidywania dotyczące częstości występowania sygnałów z układów podwójnych czarnych dziur (**Krzysztof Belczyński, Tomasz Bulik**)
- ★ Astrofizyczne własności układów podwójnych (**Michał Bejger, Izabela Kowalska-Leszczyńska, Dorota Rosińska**)
- ★ Poszukiwania towarzyszącego błysku optycznego (**Adam Zadrożny**)
- ★ Działalność w zarządzie projektu Virgo i Komisji Analizy Danych konsorcjum LIGO-Virgo (**Andrzej Królak**)
- ★ Działalność w Komitecie Przeglądu Prac (**Tomasz Bulik**)
- ★ Weryfikacja kodów numerycznych, użytych do analizy danych (**Michał Bejger**)
- ★ Wewnętrzne recenzje prac przedstawiających odkrycie (**Andrzej Królak**)

Pierwsze ogłoszenie rejestracji sygnału FG miało miejsce w Krakowie w 2010r. !



Spotkanie LIGO-Virgo Wrzesień 2010, Kraków
Konferencja zorganizowana przez POLGRAW

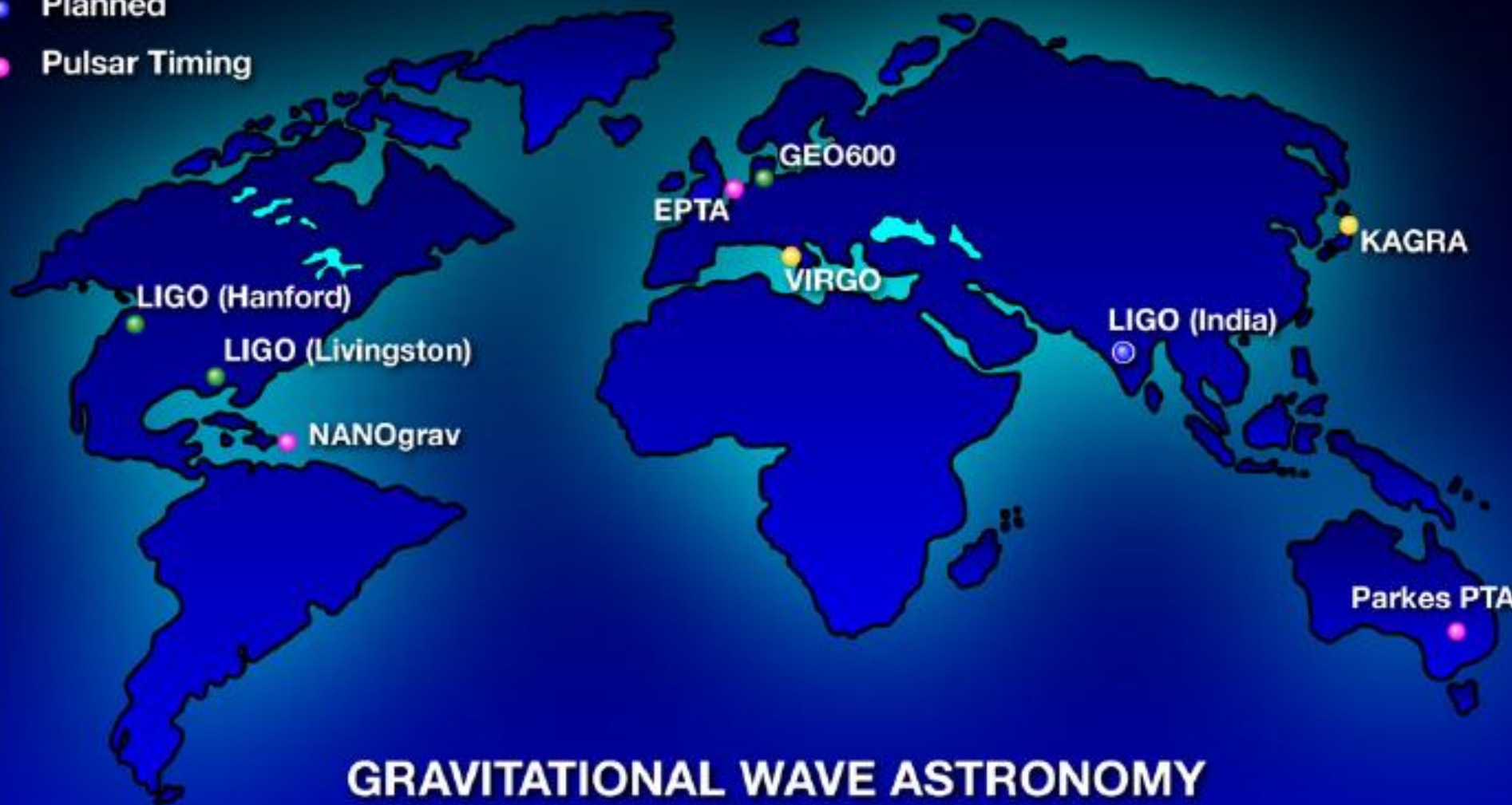
16 wrzesień 2010



**Tzw. „blind injection”
„Stress test” dla konsorcjum
LSC-Virgo**

- Interferometer
- Interferometer (under construction)
- Planned
- Pulsar Timing

LISA



GRAVITATIONAL WAVE ASTRONOMY

PTF Kraków 25.02.2016

Wnioski

Ogromny sukces projektu LIGO i również konsorcjum LSC-Virgo

- Rejestracja i analiza sygnału fali grawitacyjnej stanowi b. dokładne potwierdzenie OTW
- Zaobserwowanie układu zlewającego się układu czarnych dziur otwiera nową dziedzinę: astronomię fal grawitacyjnych
- Oczekujemy dalszych licznych obserwacji u. czarnych dziur.
- Mamy nadzieję na obserwacje innych źródeł promieniowania grawitacyjnego.
- Osobliwości czasoprzestrzeni. Nowa fizyka?