

Pierwsza bezpośrednia obserwacja fal grawitacyjnych

Michał Bejger (CAMK PAN)

Towarzystwo Naukowe Warszawskie / 8.6.16

Plan

- ★ Grawitacja i inne oddziaływania,
- ★ Fale grawitacyjne,
- ★ Detektory (interferometry),
- ★ Pierwsza bezpośrednia obserwacja fal,
- ★ Astrofizyczne źródła fal.

Cztery obecnie znane oddziaływania podstawowe

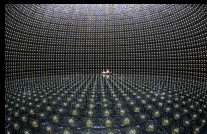
- ★ Elektromagnetyzm
(światło, promienie X,
radio, ciepło...)

★ γ foton



- ★ Oddziaływania słabe
(radioaktywność, rozpady,
neutrino)

★ bozony W^{\pm}
i Z^0



- ★ Oddziaływania silne
(stabilność jąder
atomowych)

★ gluony



- ★ Grawitacja

★ grawiton (?)



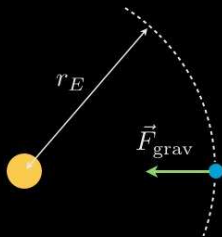
Gravity.

It's not just a good idea.

Grawitacja Newtona i Einsteina

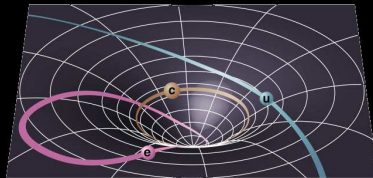
Newton: Siła grawitacyjna działająca natychmiastowo na odległość:

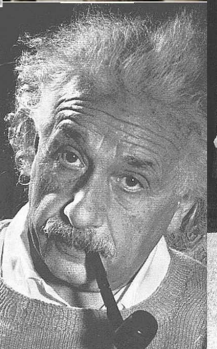
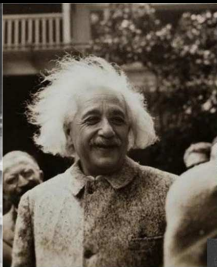
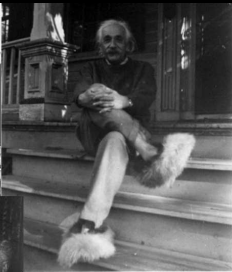
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



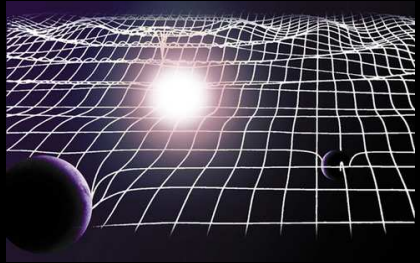
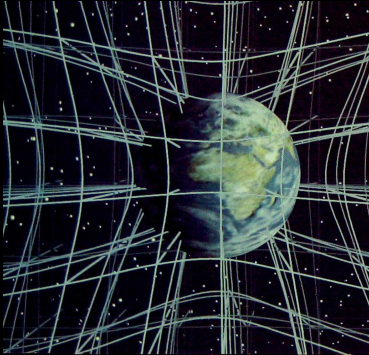
Einstein: Swobodny ruch obiektów wzdłuż „najprostszych” trajektorii w *zakrzywionej* czasoprzestrzeni.

Masy „komunikują się” używając grawitacji rozchodzącej się z prędkością światła.

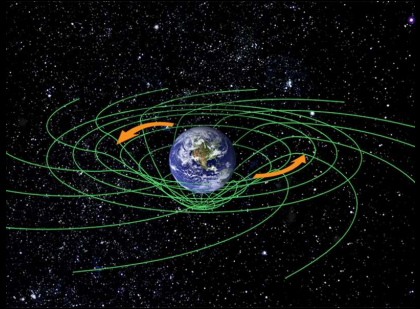




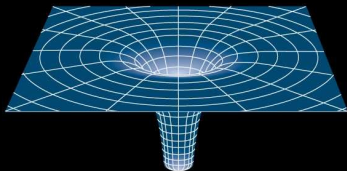
Einstein (1915): grawitacja *jest* geometrią czasoprzestrzeni



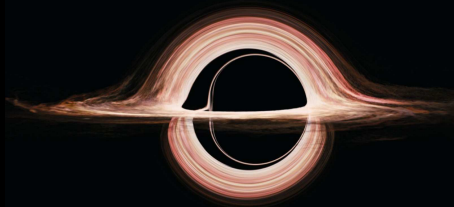
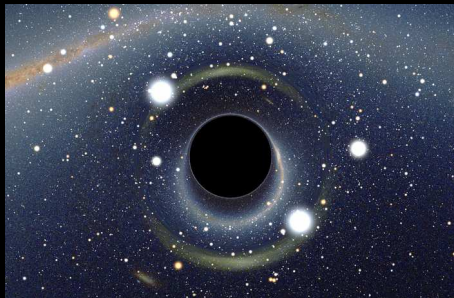
"Masy decydują o krzywiznie czasoprzestrzeni, czasoprzestrzeń decyduje o ruchu mas."



Schwarzschild (1916): czarne dziury



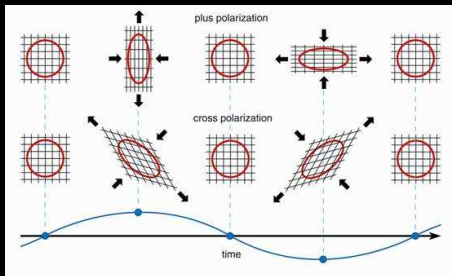
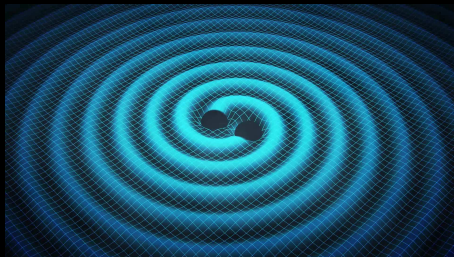
- ★ Region czasoprzestrzeni o tak dużej krzywiznie, że prędkość ucieczki z niej jest większa od prędkości światła.
- ★ Masy: kilka M_{\odot} - kilka miliardów M_{\odot} .
- ★ Czarne dziury mogą wirować (Kerr 1963).



Fale grawitacyjne

Einstein (1916) - istnieją rozwiązania równań ogólnej teorii względności, które zachowują się jak fale (*zmienne w czasie zaburzenia krzywizny propagujące się z prędkością światła*):

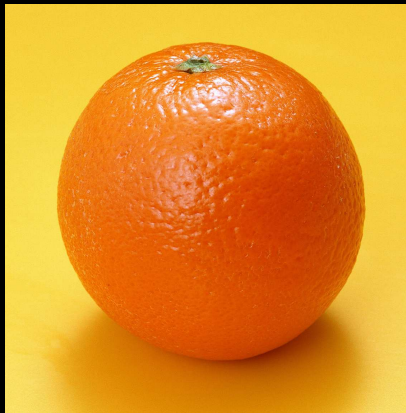
- ★ fale poprzeczne,
- ★ powstają podczas przyspieszonego ruchu ładunków (mas),
- ★ dwie polaryzacje (+ i ×).



Fale grawitacyjne

- ★ Długość fal emitowanych przez obiekty astrofizyczne λ jest o wiele mniejsza niż rozmiar innych krzywizn \mathcal{L} .
- ★ Opis krzywizny przy pomocy tensora Riemanna:

$$R_{\alpha\beta\gamma\delta} = R_{\alpha\beta\gamma\delta}^{GW} + R_{\alpha\beta\gamma\delta}^B$$



B - wielkoskalowe, „prawie-płaskie” tło,
 $\mathcal{L} \simeq 10 \text{ cm}$,
GW - małe zaburzenia, $\lambda \simeq \text{mm}$.

Fale grawitacyjne: postęp w teorii, dowody pośrednie

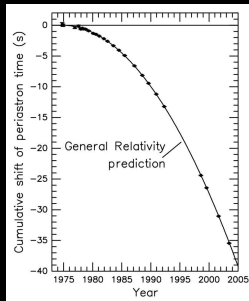
Lata 50te - przełom teoretyczny w zrozumieniu natury fal:

- ★ Herman Bondi, Felix Pirani, **Andrzej Trautman** (fale grawitacyjne przenoszą energię!)

Lata 60te - niezwykła intuicja **Bohdana Paczyńskiego**:

- ★ Ewolucja orbit układów podwójnych WZ Sge i HZ29 **zdominowana** przez emisję fal grawitacyjnych.

Lata 70te - obserwacje pulsarów w układach podwójnych (układ Hulse'a-Taylora):



Układ traci energię zgodnie z przewidywaniem teorii względności opisującym emisję fal grawitacyjnych.

Grawitacja Newtona i Einsteina



Absolutny czas i przestrzeń,
rozwiązanie dane raz na zawsze.
Niezmiennie orbity.



Niezmienny układ dwóch ciał nie istnieje.

Ciągła ewolucja dzięki aktywnej obecności trzeciego „ciała”, czasoprzestrzeni.

Idea detekcji: pomiar odległości w czasoprzestrzeni



(Quentin Blake „Izaak Newton”)

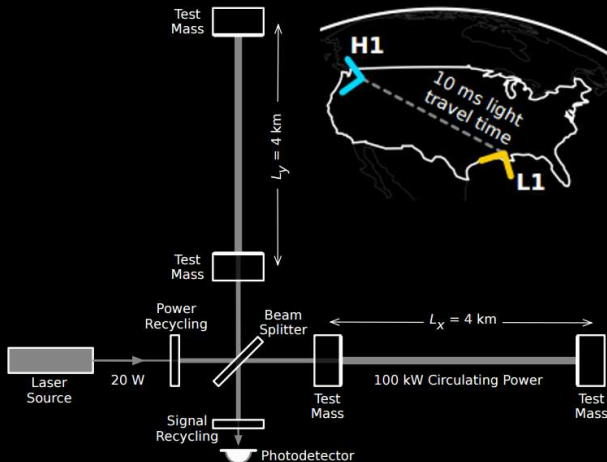


(Rene Magritte „Syn Człowieczy”)

Fale grawitacyjne zmieniają odległość pomiędzy swobodnie poruszającymi się obiektami w czasoprzestrzeni.

Idea detekcji: interferometria laserowa

”Jak mierzyć odległość, gdy linijka też zmienia długość?”



Różnice długości ramion są **bardzo** małe: $\delta L_x - \delta L_y = \Delta L < 10^{-18} \text{ m}$.

Amplituda fali $h = \Delta L/L \leq 10^{-21}$.

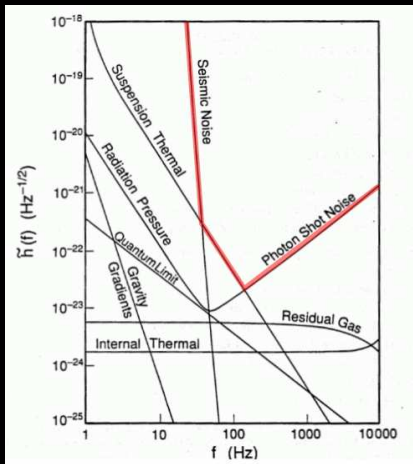
Porównanie rzędów wielkości amplitudy h

- ★ Księżyc Io na orbicie wokół Jowisza: $h \sim 3 \times 10^{-25}$
- ★ Pulsar Hulse'a-Taylor: $\sim 10^{-26}$
- ★ Zderzenie lotniskowców: 5×10^{-46}
- ★ Uczestnik demonstracji potrząsający pięścią: $\sim 7 \times 10^{-52}$

Amplituda $h = \Delta L/L \leq 10^{-21}$ odpowiada precyzji pomiaru

- ★ odległości 1000 razy mniejszej niż rozmiar protonu (10^{-15} m),
- ★ odległości Ziemia-Słońce z dokładnością do rozmiaru atomu (10^{-10} m).

Jak wygląda krzywa czułości interferometru?



Initial LIGO (1989)

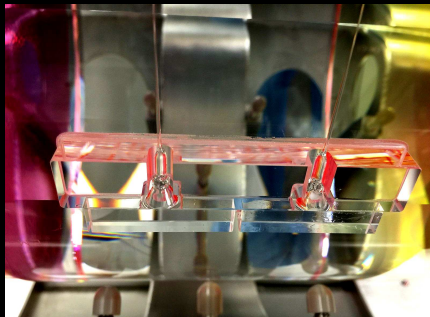
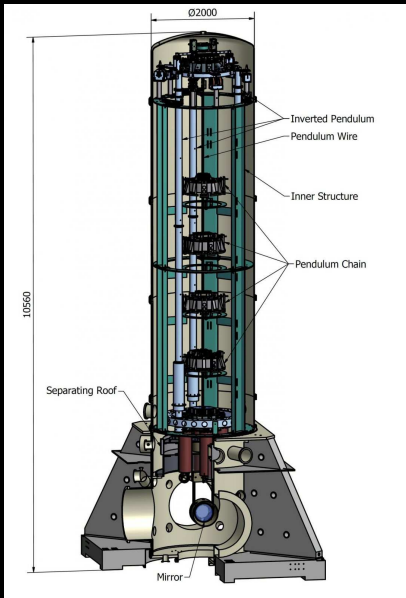
- ★ Zakres częstotliwości podobny do ludzkiego ucha:



Od około 20 Hz (H0) do paru tysięcy Hz (3960 Hz, H7) - 8 oktaw.

- ★ Podobnie jak w przypadku ucha słaba rozdzielczość kątowna.

Lustra - masy testowe

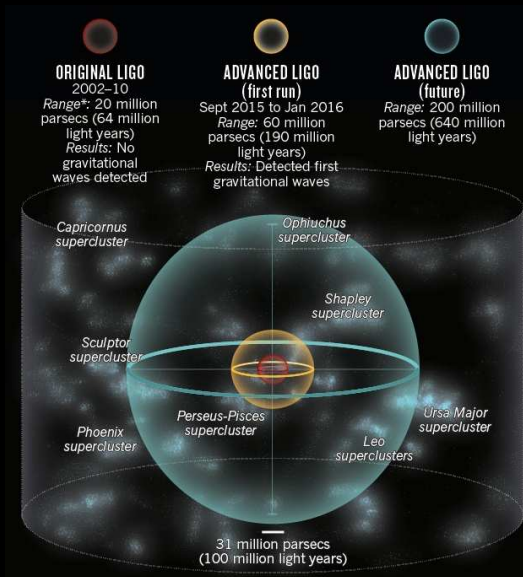


Sieć detektorów LIGO-Virgo



Koniec „Wieków Ciemnych”: kampania LIGO O1

Obserwacje dwóch detektorów LIGO: (wrzesień 2015 - styczeń 2016).



GW150914 (G184098/"The Monday Event")

[burst] Very interesting event on ER8

 burst x



 **Marco Drago** <marco.drago@aei.mpg.de>

14/09/2015 ☆




to burst, cbc, LIGO, Calibration, dac, burst, detchar, losc-devel, lsc-all ▾

Hi all,
cWB has put on gracedb a very interesting event in the last hour.

...

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

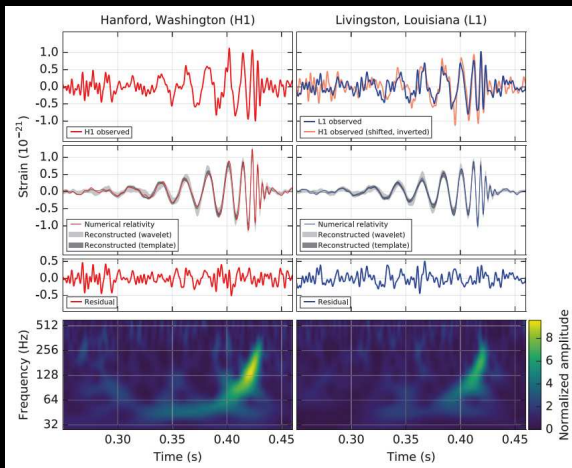
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

GW150914: układ podwójny czarnych dziur

14 września 2015 r. oba detektory LIGO (Livingston, a 7 ms później Hanford) zarejestrowały ten sam sygnał:



Parametry źródła sygnału i odległość uzyskano metodami statystycznymi (*filtr dopasowany*). Poziom istotności sygnału: $> 5.1\sigma$

GW150914: parametry

★ $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$, $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$,

★ Parametry końcowej czarnej dziury:

★ masa $M = 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$,

★ spin $a = 0.67_{-0.07}^{+0.05}$,

★ Odległość: 410_{-180}^{+160} Mpc

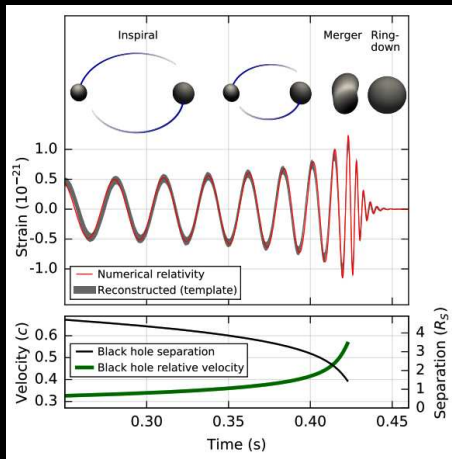
czyli 1 miliard 300 milionów lat świetlnych,
przesunięcie ku czerwieni $Z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$.

Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu: <1 na 5 milionów
Częstość wystąpienia fałszywego alarmu: <1 na 200 tysięcy lat.

GW150914: parametry

- ★ Czas trwania: **0.12 s**,
- ★ Końcowa prędkość orbitalna: **0.5 c**,
- ★ Energia wyemitowana w falach:
 $E = mc^2 = 3_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$,
- ★ W momencie największej „jasności”: **$3.6 \times 10^{49} \text{ W}$**
($200 M_{\odot} c^2 / \text{s}$),

→ kilkadziesiąt razy więcej mocy niż wszystkie gwiazdy we Wszechświecie w falach elektromagnetycznych!



Skąd wiadomo, że był to układ podwójny czarnych dziur?

Amplituda fali emitowanej przez układ podwójny

$$h \propto \mathcal{M}^{5/3} \times f^{2/3} \times r^{-1}$$

gdzie \mathcal{M} jest masą ćwierku, daną wprost z obserwacji „spirowania” układu:

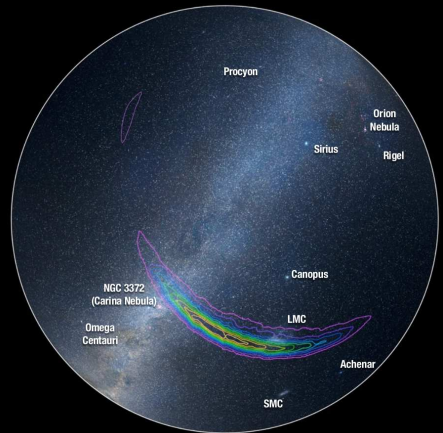
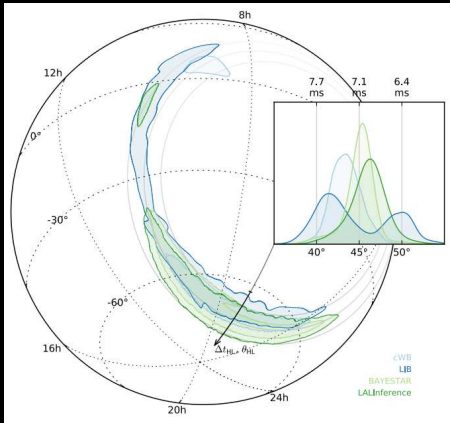
$$\mathcal{M} \equiv \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}} = \frac{c}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Z poprawek wyższego rzędu, modelu „zlewania się”: stosunek mas M_2/M_1 , tempa rotacji (spiny)...

Zarejestrowano 8 orbit do częstości 150 Hz (częstość orbitalna 75 Hz).

- ★ **Dwie gwiazdy neutronowe**: układ dostatecznie zwarty, ale za lekki,
- ★ **Gwiazda neutronowa-czarna dziura**: układ dostatecznie masywny, ale czarna dziura zbyt duża, połączenie nastąpiłoby przy niższej częstości.

Położenie źródła na niebie



600 stopni kwadratowych z wiarygodnością 90% (trzeci detektor - **Virgo** - niezbędny do triangulacji!)

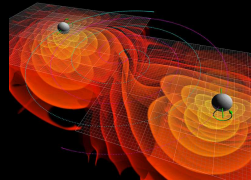
Źródła astrofizyczne: układy podwójne

Jednorazowe zjawiska kataklizmiczne dobrze opisywane modelami, np. ostatnie chwile układu podwójnego

- ★ dwóch czarnych dziur,
- ★ dwóch gwiazd neutronowych,
- ★ czarnej dziury i gwiazdy neutronowej.



(Hokusai „Wielka fala w Kanagawie”)



Symulacja „zlewania się” dwóch czarnych dziur (C.

Henze/NASA Ames Research Center)

Źródła astrofizyczne: „wybuchy”



(Isoda Koryūsai „Żuraw, fale i wschodzące słońce”)

Jednorazowe zjawiska, które trudno modelować, np.

- ★ wybuchy supernowych,
- ★ długie błyski gamma.



Mgławica Krab, pozostałość po supernowej 1054CE

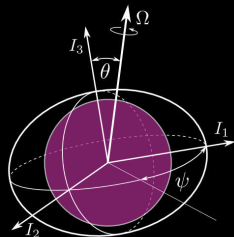
Źródła astrofizyczne: fale ciągłe



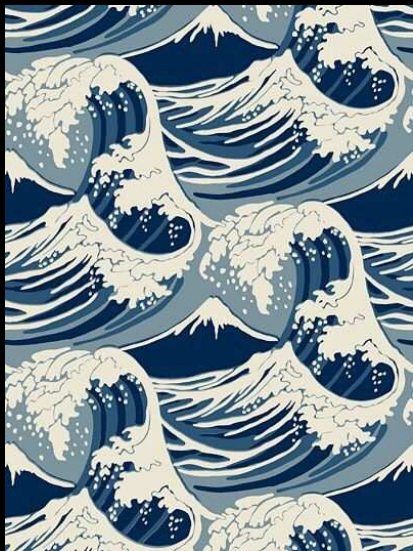
(Shoson „Lądujące żurawie”)

Zjawiska periodyczne, np.

- ★ rotujące nieosiowosymetryczne gwiazdy neutronowe („grawitacyjne pulsary”).



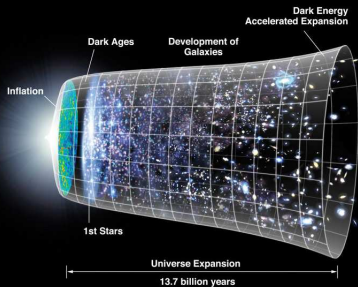
Źródła astrofizyczne: tło



(tapeta firmy Cole & Son)

Stochastyczne tło, czyli

- ★ fale emitowane przez populacje obiektów,
- ★ fale pochodzące z wczesnego Wszechświata.



Źródła astrofizyczne: niespodzianki



(Sharaku „Aktor Otani Oniji III grający Yakko Edobei”)

Podsumowanie

Obserwacja GW150914 oznacza:

- ★ potwierdzenie przewidywania teorii względności,
 - ★ pierwszą bezpośrednią detekcję fali grawitacyjnej,
 - ★ pierwszą obserwację dynamicznie zmiennego horyzontu,
 - ★ nowy sposób pomiaru mas i temp rotacji (spinów) czarnych dziur,
 - ★ pierwszą obserwację układu podwójnego czarnych dziur,
 - ★ rejestrację „najjaśniejszego” zjawiska astrofizycznego w historii,
 - ★ nowe ograniczenie na masę grawitonu.
-
- ★ **Zupełnie nowy sposób badania Wszechświata: początek astronomii fal grawitacyjnych.**