

# Fale grawitacyjne

Michał Bejger, Centrum Astronomiczne PAN

Spotkania z astronomią / 7.3.16



- ★ Wstęp - grawitacja i inne siły, czarne dziury,
- ★ Fale grawitacyjne,
- ★ Detektory fal grawitacyjnych,
- ★ Pierwsza bezpośrednia detekcja,
- ★ Jak wyglądają dane z detektorów?
- ★ Inne źródła astrofizyczne.

# Cztery podstawowe oddziaływania

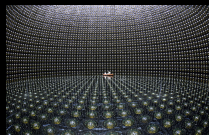
- ★ Elektromagnetyzm  
(światło, ciepło,  
promienie X, radio...)

★ foton  $\gamma$



- ★ Oddziaływanie słabe  
(radioaktywność,  
neutrino)

★ bozony  $W^{\pm}$   
i  $Z^0$



- ★ Oddziaływanie silne  
(energia jądrowa)

★ gluony



- ★ Grawitacja

★ grawiton (?)



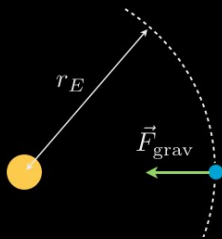
**Gravity.**

It's not just a good idea.  
It's the Law.

# Opis grawitacji według Newtona i Einsteina

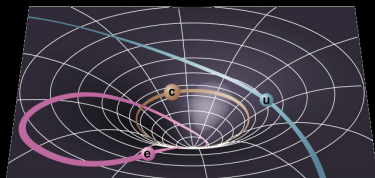
**Newton:** Siła grawitacyjna działająca natychmiastowo na odległość:

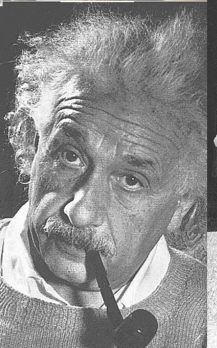
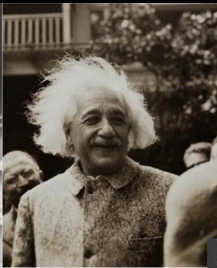
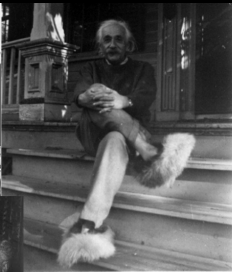
$$F = \frac{Gm_1 m_2}{r^2}$$



**Einstein:** swobodny ruch ciał po „najprostszyc” trajektoriach w zakrzywionej czasoprzestrzeni.

Oddziaływanie grawitacyjne rozchodzi się z prędkością światła.





# Problem z Newtonem i Maxwellem → teoria względności

- ★ **Równania Maxwella** niezmiennicze względem transformacji Lorentza:

$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right),$$

$$x' = \gamma (x - vt),$$

$$y' = y,$$

$$z' = z.$$

- ★ **Równania Newtona** niezmiennicze względem transformacji Galileusza:

$$t' = t,$$

$$x' = x - vt,$$

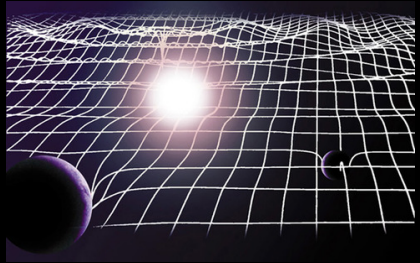
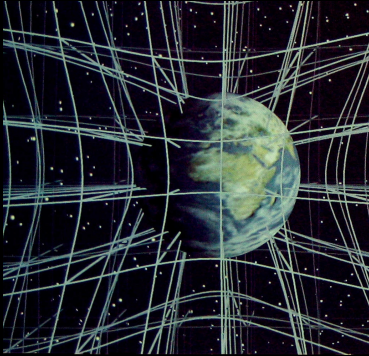
$$y' = y,$$

$$z' = z.$$

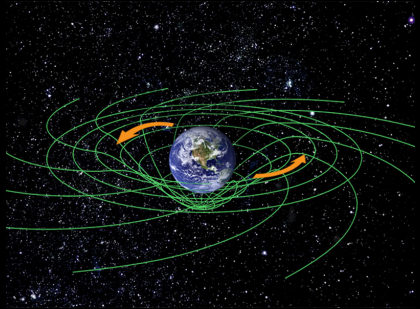
**Rozwiązanie:** nowa teoria (**szczególna teoria względności**), która

- ★ splata czas i przestrzeń (jest zgodna z transformacją Lorentza),
- ★ poprawnie opisuje ruch ciał z prędkościami bliskimi  $c$ ,
- ★ przestrzega zakazu przekraczania prędkości  $c$ ,
- ★ zachowuje  $c = \text{const.}$  we wszystkich układach odniesienia,
- ★ w granicy  $v/c \rightarrow 0$  daje mechanikę Newtona.

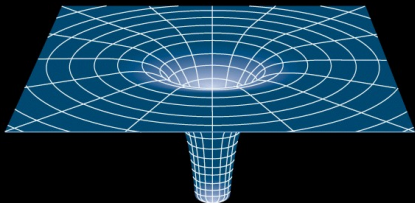
# Einstein (1915): grawitacja jako geometria zakrzywionej czasoprzestrzeni



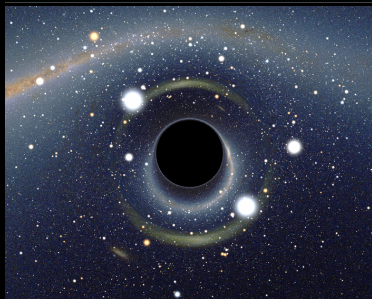
„Masy zakrzywiają  
czasoprzestrzeń,  
czasoprzestrzeń kieruje  
ruchem mas”



# Schwarzschild (1916): czarne dziury



- ★ Obszar czasoprzestrzeni tak zakrzywionej, że nie da się z niego uciec nawet z prędkością światła.
- ★ Obiekty o masach od paru  $M_{\odot}$  do miliardów  $M_{\odot}$ .
- ★ Czarne dziury rotują (Kerr 1963).

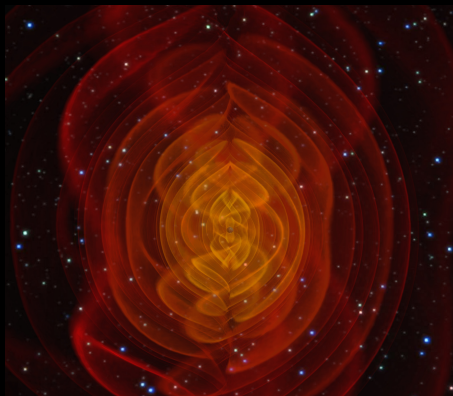
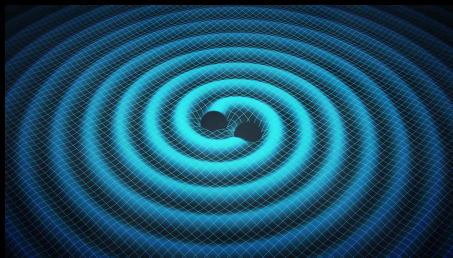




# Fale grawitacyjne

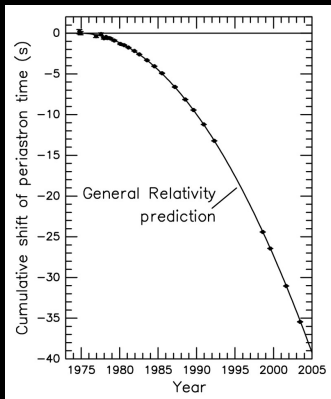
Einstein (1916) - istnieją rozwiązania zachowujące się jak fale (*zmienne w czasie zaburzenia krzywizny poruszające się z prędkością światła*):

- ★ fale poprzeczne,
- ★ generowane przez przyspieszony ruch mas,
- ★ dwie polaryzacje (+ i ×).

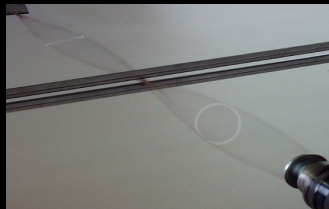


# Prędkość fal. Polaryzacje

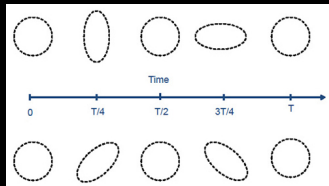
Obserwacje pulsarów w ciasnych układach podwójnych:



Układ traci energię emitując fale grawitacyjne. Prędkość rozchodzenia się fal = prędkość światła.

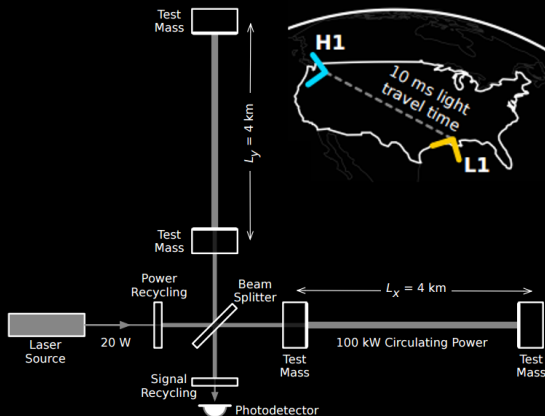


Efekt polaryzacji płaskiej fali grawitacyjnej (z dala od źródła),  
 $+ \dot{\times}$ :



# Detekcja fal. Interferometria laserowa

„Jak wykryć zmiany długości, gdy zmienia się też długość linijki?!”



Zmiany długości ramion są **bardzo** małe:  $\Delta L < 10^{-18} \text{ m}$  (dużo mniej niż rozmiar protonu,  $10^{-15} \text{ m}$ ). Amplituda fali  $h = \Delta L/L \leq 10^{-21}$ .

# Sieć detektorów LIGO-Virgo



# Porównanie rzędów wielkości

- ★ GW150914:  $h = \Delta L/L \simeq 10^{-21}$
  - ★ Układ podwójny gwiazd neutronowych w centrum Galaktyki:  $2 \times 10^{-19}$
  - ★ Księżyc Io na orbicie wokół Jowisza:  $\sim 3 \times 10^{-25}$
  - ★ Pulsar Hulse'a-Taylor:  $\sim 10^{-26}$
  - ★ Zderzenie lotniskowców:  $5 \times 10^{-46}$
  - ★ Uczestnik demonstracji potrząsający pięścią:  $\sim 7 \times 10^{-52}$
  - ★ Piłka tenisowa na sznurku długości 1 m, z odległości 10 m:  $\sim 10^{-54}$ .
- 
- ★ Amplituda  $h = \Delta L/L \leq 10^{-21}$  odpowiada zmierzeniu odległości Ziemia-Słońce z dokładnością do rozmiaru atomu ( $10^{-10}$  m)
  - ★ Amplituda ruchów gruntu w pobliżu detektora:  $\Delta L \sim 10^{-6}$  m ( $10^{12} \times h$ )
  - ★ Długość światła lasera:  $10^{-6}$  m ( $10^{12} \times h$ )

# Pierwsza bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych

Obserwacja GW150914 przez dwa detektory LIGO w  
Livingston i Hanford (14 września 2015)

[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

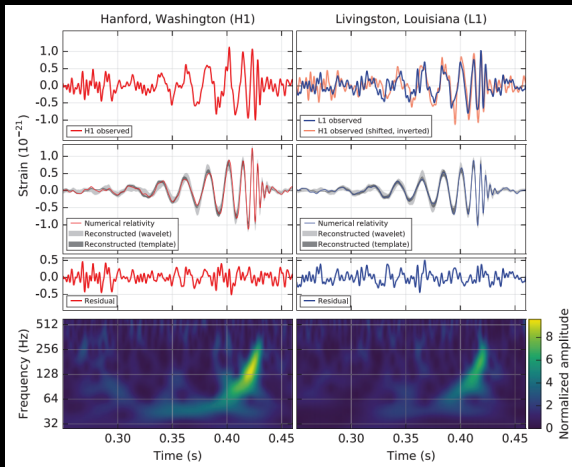
B. P. Abbott *et al.*\*

(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 zostały otrzymane metodami statystycznymi (*filtr dopasowany*). **Poziom istotności sygnału:**  $> 5.1\sigma$



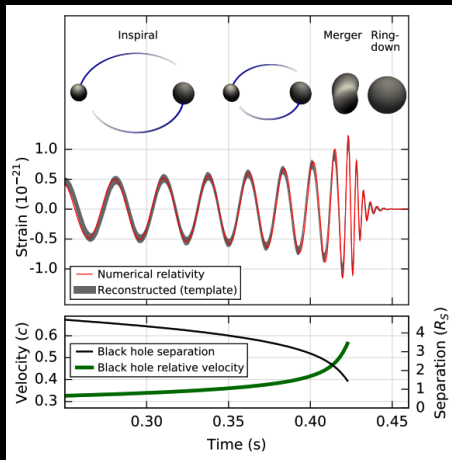
# GW150914: parametry

- ★  $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ ,  $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$ ,
- ★ 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  $Z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ .

# GW150914: parametry

- ★ Czas trwania: **0.2 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!



# Pomiar masy grawitonu

Zakładając, że grawiton to cząstka o masie  $m_g$ , efektywny potencjał Newtonowski będzie

$$\psi \propto \frac{\exp(-r/\lambda_g)}{r},$$

gdzie  $\lambda_g$  to komptonowska długość fali,  $\lambda_g = h/m_g c$ . Prędkość grawitacji  $v_g$

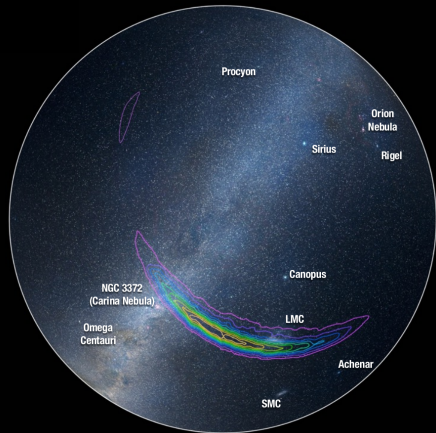
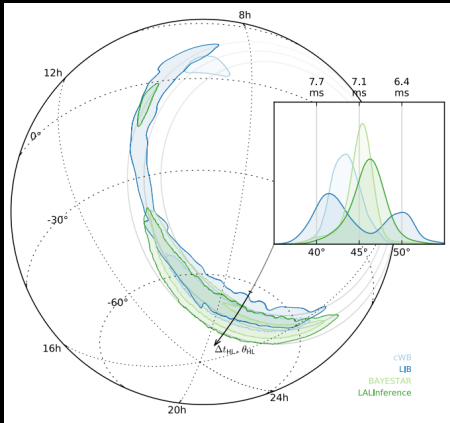
$$\left(\frac{v_g}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{c}{f\lambda_g}\right)^2,$$

gdzie  $f$  to częstość fali.

Wyniki z obserwacji GW150914:

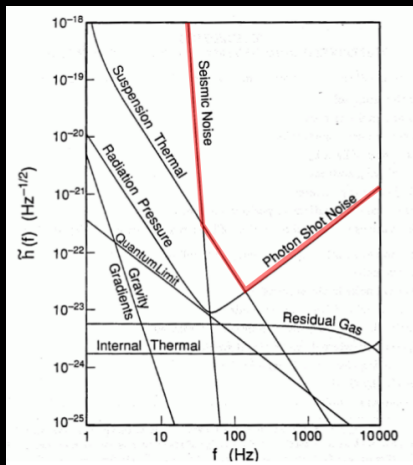
$$\lambda_g > 10^{13} \text{ km} \quad \Rightarrow \quad m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2.$$

# Położenie źródła na niebie



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

# Jak wygląda krzywa czułości detektorów?



Projekt Initial LIGO (1989)

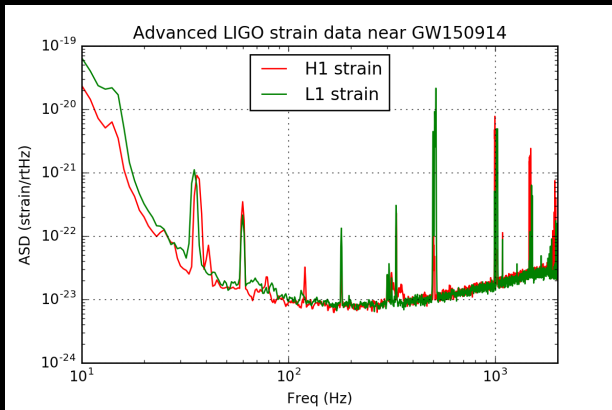
- ★ Zakres częstotliwości podobny do zakresu ludzkiego ucha, jak w pianinie:



Od około 30 Hz (H0) do kilku tysięcy Hz (3960 Hz, H7) - 8 oktaw.

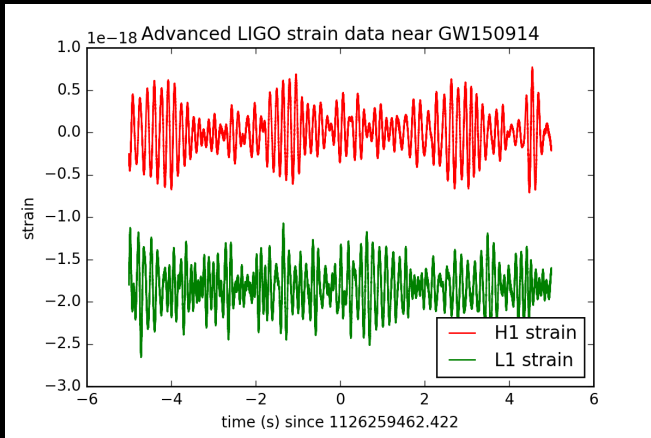
- ★ Słaba, jak w przypadku ucha, rozdzielczość kątowa.

# Jak wygląda krzywa czułości detektorów?



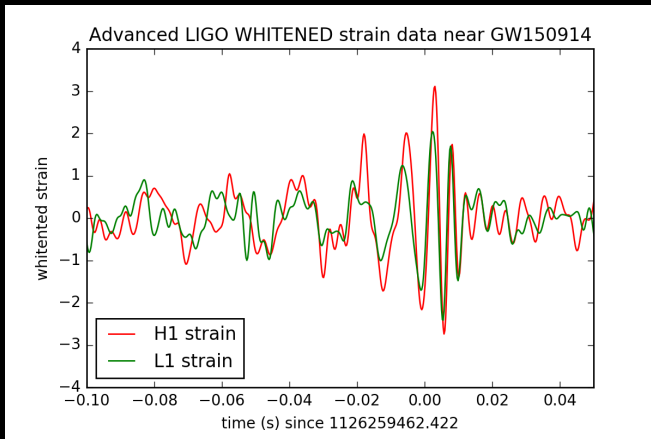
Widoczne linie są pochodzenia instrumentalnego (*rysunek jest zdominowany przez szum detektora*): rezonans zawieszenia luster, 500 Hz i harmoniki, linie kalibracyjne, zasilanie (60 Hz i harmoniki) itd.

# Jak wyglądają „surowe dane”?



Ciąg czasowy jest **zdominowany** przez **szum o niskiej częstotliwości** (dane L1 przesunięte o  $-2 \times 10^{-18}$  przez oscylacje o niskiej częstotliwości!).

# Dane „odfiltrowane” w okolicy GW150914



Usunięto częstotliwości dużo wyższe i dużo niższe od tych związanych z GW150914, oraz linie instrumentalne.



# Skąd wiadomo, że to układ podwójny czarnych dziur?

Amplituda fal grawitacyjnej emitowana przez układ podwójny

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

gdzie  $\mathcal{M}$  jest masą ćwierku,  $\mathcal{M} = \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}}$ , znaną wprost z obserwacji ewolucji sygnału:

$$\mathcal{M} = \frac{c}{G} \left[ \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Z poprawek wyższego rzędu i modelu zlewania się: stosunek mas  $q = M_2/M_1$ , spiny...

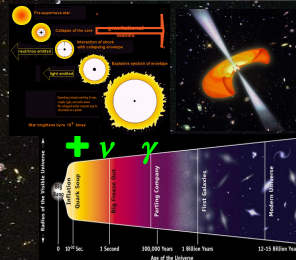
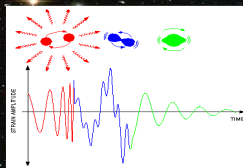
$$\mathcal{M} \simeq 30 M_{\odot} \implies M_1 + M_2 \simeq 70 M_{\odot}$$

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

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

# Astrofizyczne źródła sygnałów

- Układy podwójne
  - NS-NS, NS-BH, BH-BH
  - Inspiral, merger, ringdown
  - Rozwiązania analityczne + numeryczne symulacje w OTW
- „Błyski”
  - np. supernowe, niestabilności
- Chaotyczne tło
  - Wczesny Wzzechświat ( $t = 10^{-22}$  s)
  - Tło od populacji źródeł
- Źródła periodyczne
  - Podwójne pulsary, rotujące gwiazdy neutronowe, Low mass X-ray binaries
- *Coś nieprzewidzianego!*



Mountain on neutron star. Wobbling neutron star



Accreting neutron star



R-modes

# Podsumowanie

Ostatnio byliśmy świadkami:

- ★ pierwszej bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych,
- ★ pierwszej obserwacji dynamicznie zmiennego horyzontu,
- ★ nowego sposobu pomiaru mas i temp rotacji (spinów) czarnych dziur,
- ★ pierwszej obserwacji układu podwójnego czarnych dziur,
- ★ „najjaśniejszego” zjawiska zaobserwowanego dotychczas w historii,
- ★ nowego ograniczenia na masę grawitonu,
- ★ **Zupełnie nowy sposób badania Wszechświata: początek astronomii fal grawitacyjnych.**