

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Fale grawitacyjne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

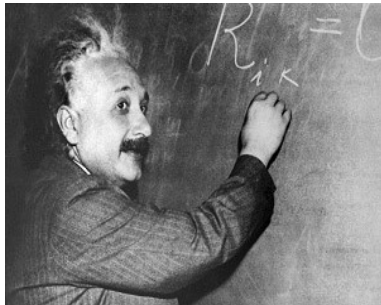
23 stycznia 2018

- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

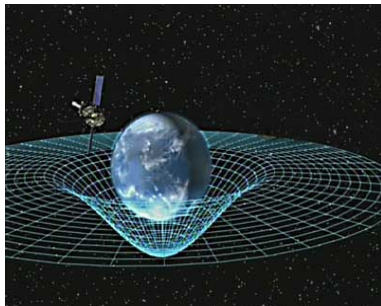
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



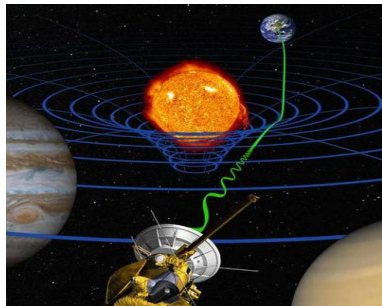
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu "swobodnej" materii

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

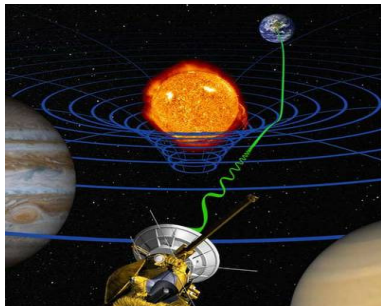
Światło porusza się po trajektoriiach odpowiadających **najmniejszej odległości** (najszybszej propagacji) między dwoma punktami.

W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

Problem teorii Einsteina: **nie istniało statyczne rozwiązanie**.

Aby **uratować statyczny Wszechświat** Einstein dołożył do swoich równań dodatkowy czynnik: **stałą kosmologiczną - Λ**

Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow "skala kosmologiczna"

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

Big Bang - Wielki Wybuch

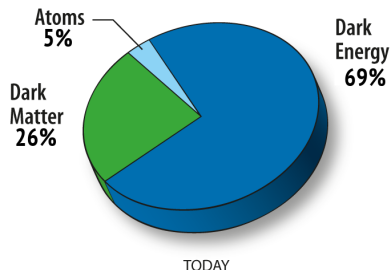
Model Λ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia**... (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną (Λ)

Wszechświat zdominowany przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej** (!)

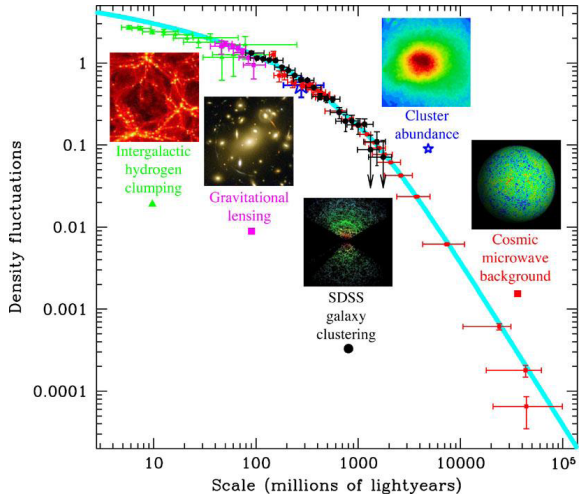
Wiek Wszechświata: $T = 13.799 \pm 0.038$ Gyr



Fluktuacje gęstości

Model Λ CDM

Model kosmologiczny uwzględniający:
 stałą kosmologiczną (Λ) i
 Zimną Ciemną Materię
 (Cold Dark Matter - CDM)
 bardzo dobrze opisuje
 fluktuacje gęstości
 Wszechświata na różnych
 skalach odległości.

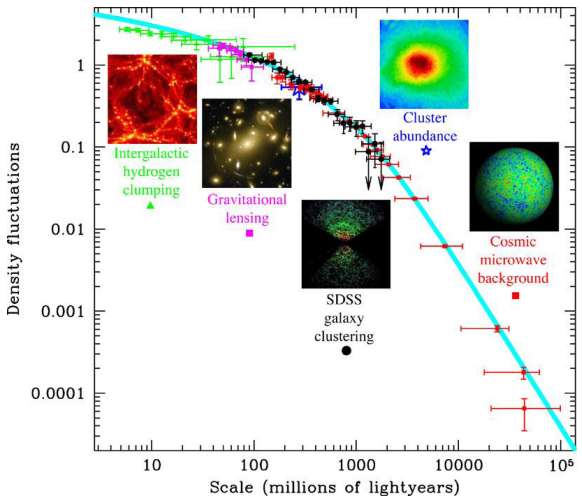


Fluktuacje gęstości

Model Λ CDM

Model kosmologiczny uwzględniający:
 stałą kosmologiczną (Λ) i
 Zimną Ciemną Materię (Cold Dark Matter - CDM)
 bardzo dobrze opisuje fluktuacje gęstości
 Wszechświata na różnych skalach odległości.

Ale przecież na początku zakładaliśmy, że
Wszechświat jest jednorodny i izotropowy !?...



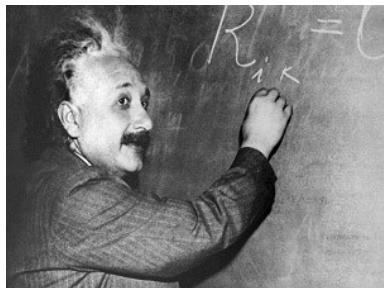
- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

Ogólna Teoria Względności,
sformułowana przez Einsteina w 1916,
opisuje ewolucję Wszechświata na
"skalach kosmologicznych"

Zakładamy, że na bardzo dużych
odległościach Wszechświat jest
jednorodny i izotropowy.

Ale co się dzieje na mniejszych skalach?

Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...



Ogólna Teoria Względności,
sformułowana przez Einsteina w 1916,
opisuje ewolucję Wszechświata na
"skalach kosmologicznych"

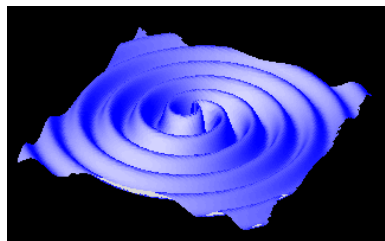
Zakładamy, że na bardzo dużych
odległościach Wszechświat jest
jednorodny i izotropowy.

Ale co się dzieje na mniejszych skalach?

Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...

Jeśli masy poruszają się z przyspieszeniem, mogą emitować fale grawitacyjne (podobnie jak przyspieszane ładunki fale E-M).

Tylko fale grawitacyjne są dużo, dużo słabsze...



Fale grawitacyjne

Detekcja pośrednia

W 1974 Joseph Taylor i Russell Hulse odkryli pulsar PSR 1913+16.

Zauważyli regularne zmiany w jego okresie pulsacji (59 ms), które wynikały z efektu Dopplera

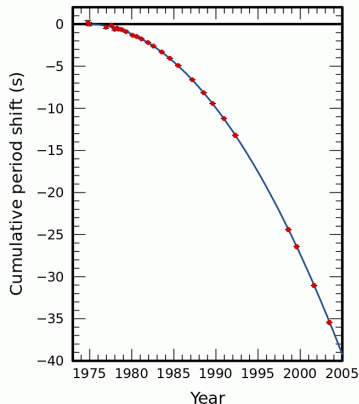
⇒ pulsar krąży dookoła innej gwiazdy w układzie podwójnym (okres 7.75 h)

Długoczasowe obserwacje pokazały, że okres obiegu się skraca

⇒ układ wiruje coraz szybciej

⇒ straty energii powodowane emisją fal grawitacyjnych

W bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami OTW ⇒ Nobel 1993



Możliwe źródła

Fal elektromagnetyczne powstają w bardzo szerokiej gamie zjawisk: oscylacje prądu elektrycznego (np. radio), wyładowania elektryczne (np. piorun), przejścia atomowe i jądrowe, itp.

Możliwe źródła

Fal elektromagnetyczne powstają w bardzo szerokiej gamie zjawisk: oscylacje prądu elektrycznego (np. radio), wyładowania elektryczne (np. piorun), przejścia atomowe i jądrowe, itp.

Podobnie możemy rozważać wiele różnych źródeł fal grawitacyjnych.

- wirujący układ podwójny dwóch masywnych obiektów
- szybko wirujący pojedynczy niesymetryczny obiekt
- zderzenie/złanie się dwóch masywnych obiektów
- wybuch masywnego obiektu

Możliwe źródła

Fal elektromagnetyczne powstają w bardzo szerokiej gamie zjawisk: oscylacje prądu elektrycznego (np. radio), wyładowania elektryczne (np. piorun), przejścia atomowe i jądrowe, itp.

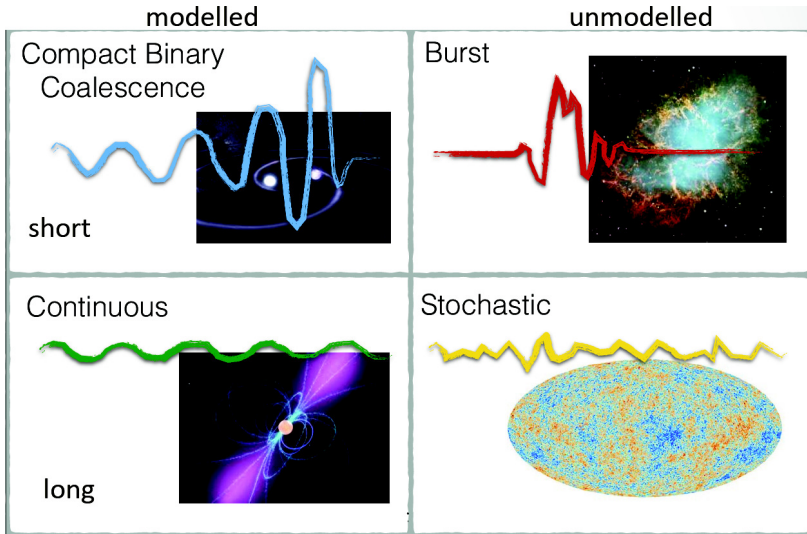
Podobnie możemy rozważać wiele różnych źródeł fal grawitacyjnych.

- wirujący układ podwójny dwóch masywnych obiektów
- szybko wirujący pojedynczy niesymetryczny obiekt
- zderzenie/złanie się dwóch masywnych obiektów
- wybuch masywnego obiektu

Aby emisja fal grawitacyjnych była istotna, musimy mieć:

- duże masy
- małe rozmiary/małe odległości
- duże prędkości

Możliwe źródła



Własności

Fale grawitacyjne zachowują się podobnie do fal elektromagnetycznych:

- poruszają się z tą samą prędkością (prędkość światła)
- podlegają odchyleniom na skutek zakrzywienia czasoprzestrzeni
- podlega przesunięciu ku czerwieni
- niosą energię, pęd i moment pędu (!)

Jednak fale grawitacyjne w bardzo niewielkim stopniu podlegają absorpcji w materii \Rightarrow dlatego jej wykrycie jest tak trudne

Przechodząca fala grawitacyjna nie powoduje ruchu obiektów !

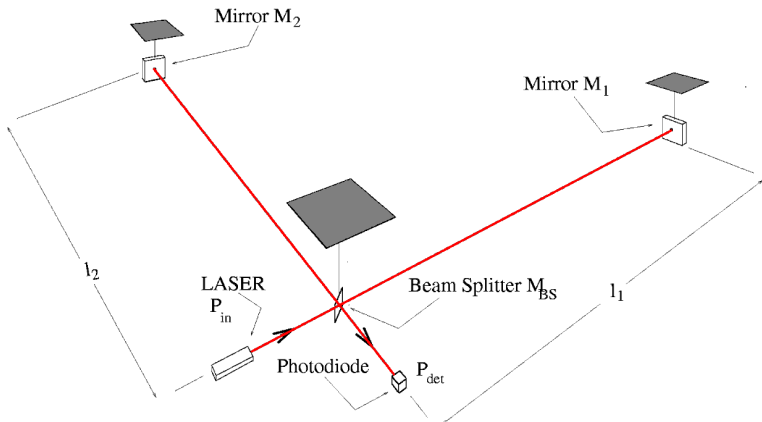
Deformacja przestrzeni \Rightarrow zmiana odległości między obiektami
 \Rightarrow pomiary interferometryczne

- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

Interferometry

Idea: powtórzenie eksperymentu Michelsona-Morleya

Szukamy periodycznych zmian czasu propagacji (prędkości światła)

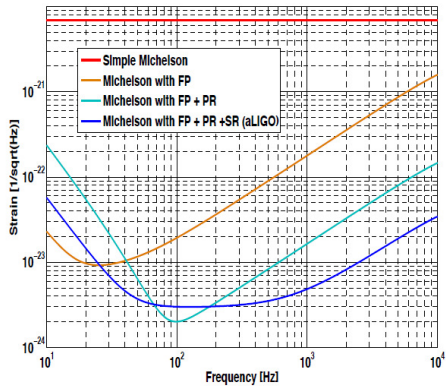
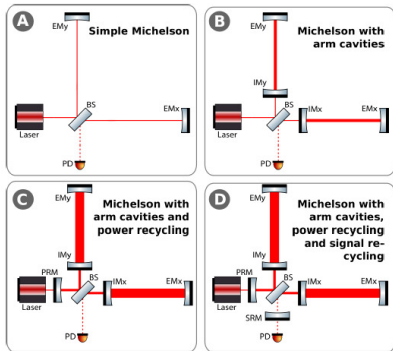


Fale grawitacyjne

Interferometry

Szukamy jednak ekstremalnie małych zmian! $\Delta L/L \sim 10^{-21}$

⇒ wnęki rezonansowe pozwalają wydłużyć drogę impulsów światła



VIRGO (Włochy) ramiona o długości 3 km



LIGO (Hanford, USA) ramiona o długości 4 km



LIGO (Livingston, USA) ramiona o długości 4 km

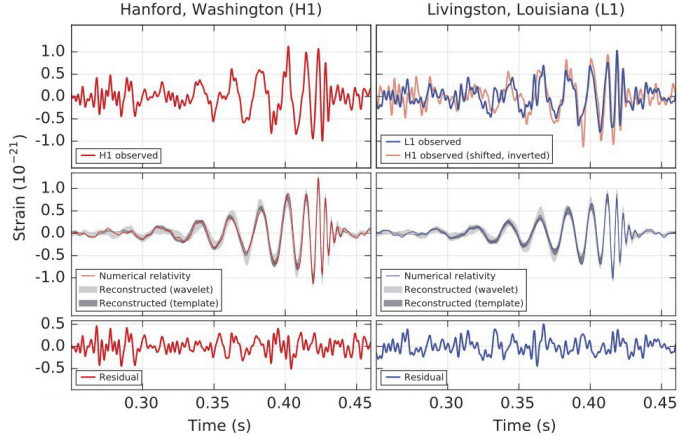


- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych**
- 4 GW170817

Fale grawitacyjne

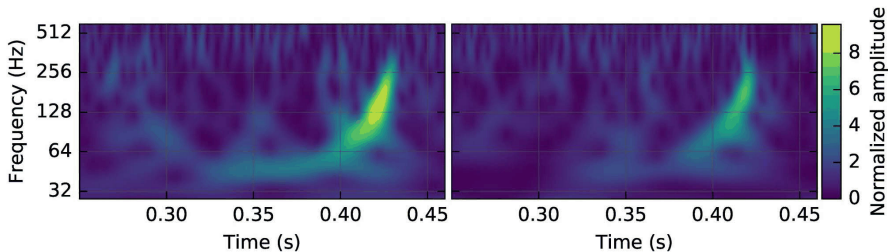
Odkrycie

14 września 2015, o 09:50:45 UTC, sygnał w obu detektorach LIGO “znaleziony” przez algorytm szukający kolapsu układu podwójnego



Odkrycie

Badzo silny sygnał, wyraźnie widoczny na rozkładzie czas-częstość

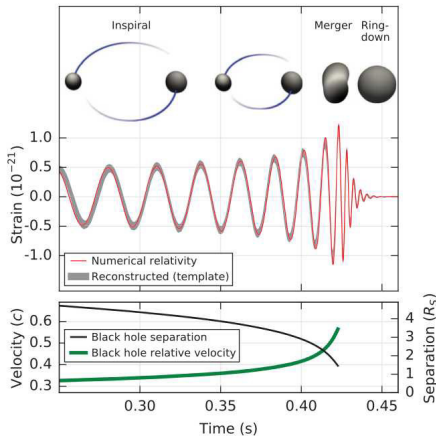


Oczekiwany poziom tła dla tego natężenia sygnału:

1 przypadek na 203'000 lat !

Fale grawitacyjne

GW150914 wygląda jak zlanie się dwóch masywnych czarnych dziur



Początkowe masy:

$$M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$$

$$M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Końcowa czarna dziura:

$$M_f = 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Odległość:

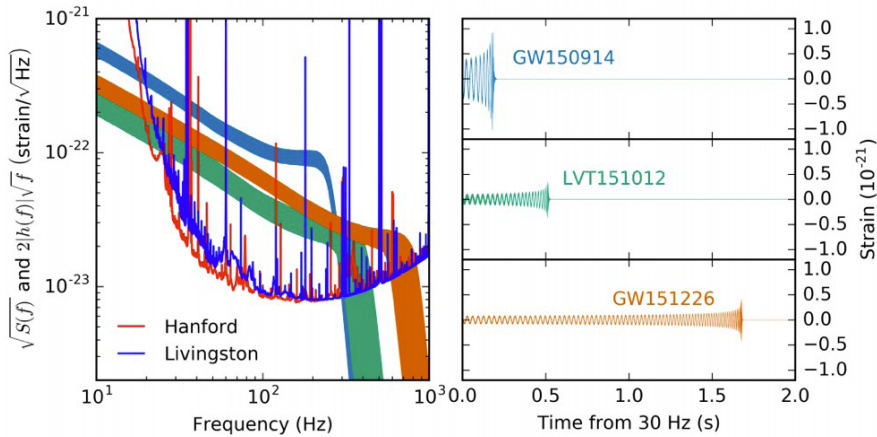
$$d = 410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

$$= 1.34_{-0.59}^{+0.52} \text{ Gly}$$

Dobra zgodność z OTW

Wyniki LIGO 2015

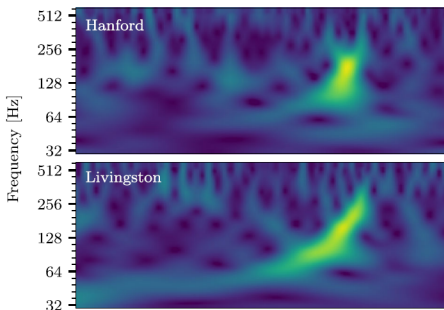
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w 2015: jeden "pewny" (GW151226) i jeden "kandydat" (LVT151012)



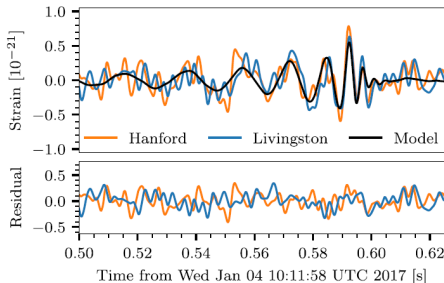
Przypadek 2017 Zaprezentowany 1 czerwca 2017

Po “chudym” roku 2016 (m.in. przerwa na usprawnianie detektora), znów udało się zaobserwować silny “błysk”.

Widmo częstotliwości

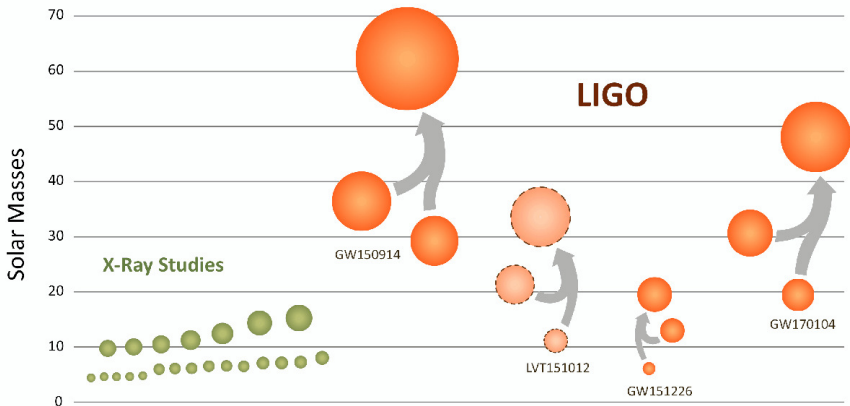


Dopasowanie wzorca



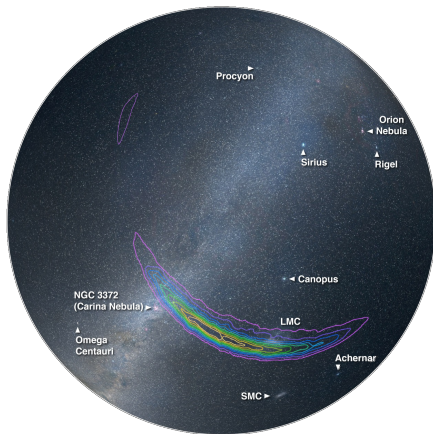
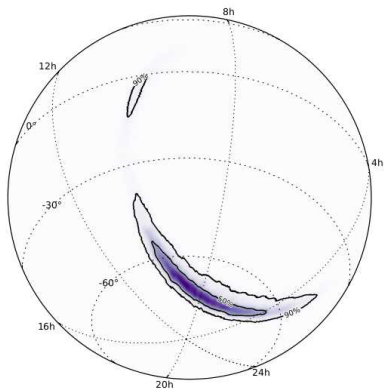
Widmo mas czarnych dziur

Rekonstruowane przez LIGO masy czarnych dziur są znacznie większe niż się spodziewaliśmy. Może nas to zmusić do zmiany naszych modeli...



Położenie GW150914

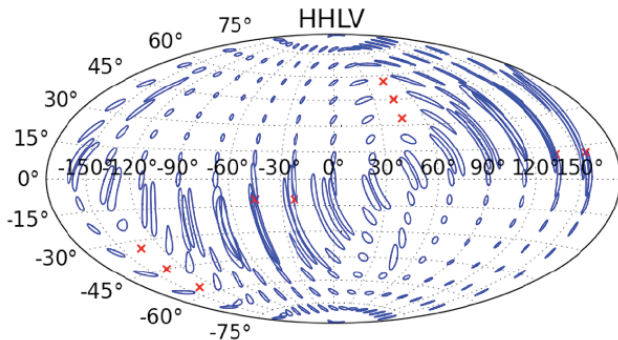
Niestety, w oparciu o pomiar w dwóch interferometrach nie jest możliwe jednoznaczne określenie pozycji. Nie zidentyfikowano potencjalnego źródła...



Fale grawitacyjne

Położenie źródeł

Znacznie dokładniejsze wyznaczenie pozycji stało się dopiero możliwe po uruchomieniu detektora VIRGO w sierpniu 2017



Fairhurst 2011

Red crosses denote
regions where the
network has blind spots

10

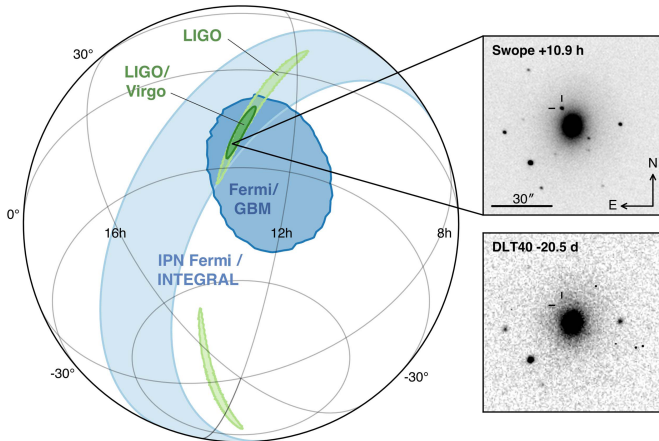
- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 **GW170817**

Fale grawitacyjne

GW170817

LIGO i Virgo działały razem tylko przez miesiąc. Ale udało się zaobserwować dwa impulsy fal grawitacyjnych (!).

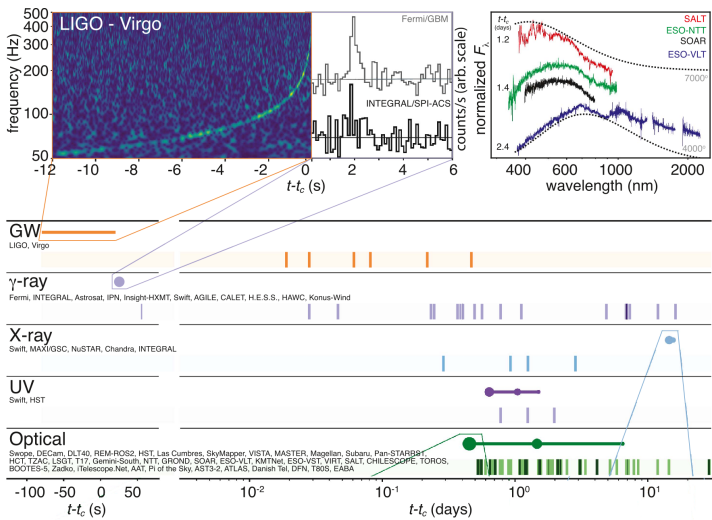
Drugi z nich był wyjątkowy! Także inne eksperymenty go zobaczyły !...



Fale grawitacyjne

GW170817

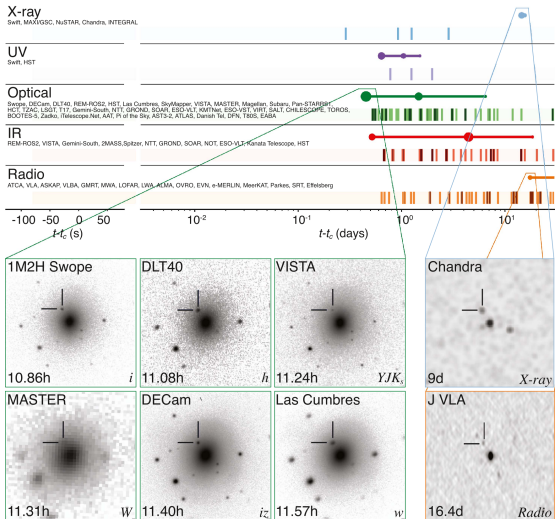
Jednocześnie z impulsem grawitacyjnym zaobserwowano błysk gamma...



Fale grawitacyjne

GW170817

Po kilkunastu godzinach (musiała nastać noc) sygnał optyczny...



GW170817

Wyniki obserwacji wskazują na to, że byliśmy świadkami złania się układu **dwóch gwiazd neutronowych** o masach rzędu 1.8 i 1.1 mas Słońca.

Wybuch tzw. “kilonowej” obserwowany w galaktyce NGC4993 miał miejsce ok. **100 milionów lat temu...**

Sam wybuch trwał ok. 60 sekund, ale wyrzucone z ogromną prędkością strugi materii oddziaływały z materią międzygwiazdową jeszcze przez wiele tygodni emitując promieniowanie rentgenowskie, optyczne, radiowe...

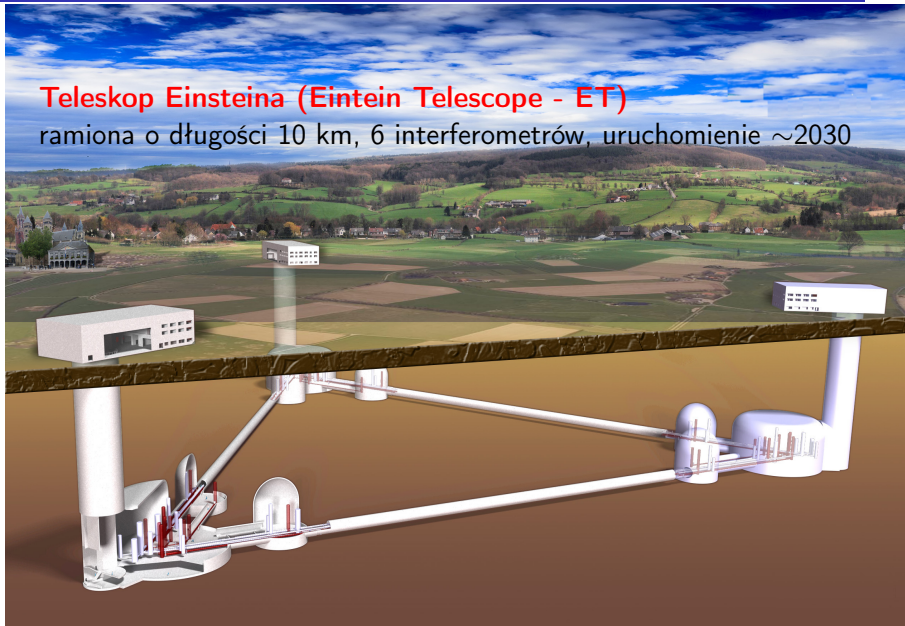
Obserwacje potwierdzają m.in., że w tego typu wybuchach produkowane są ciężkie pierwiastki jak ołów, złoto, platyna...

Potwierdziliśmy przewidywania Ogólnej Teorii Względności.

Prędkość fal grawitacyjnych jest równa prędkości światła z dokładnością rzędu 10^{-15} ...

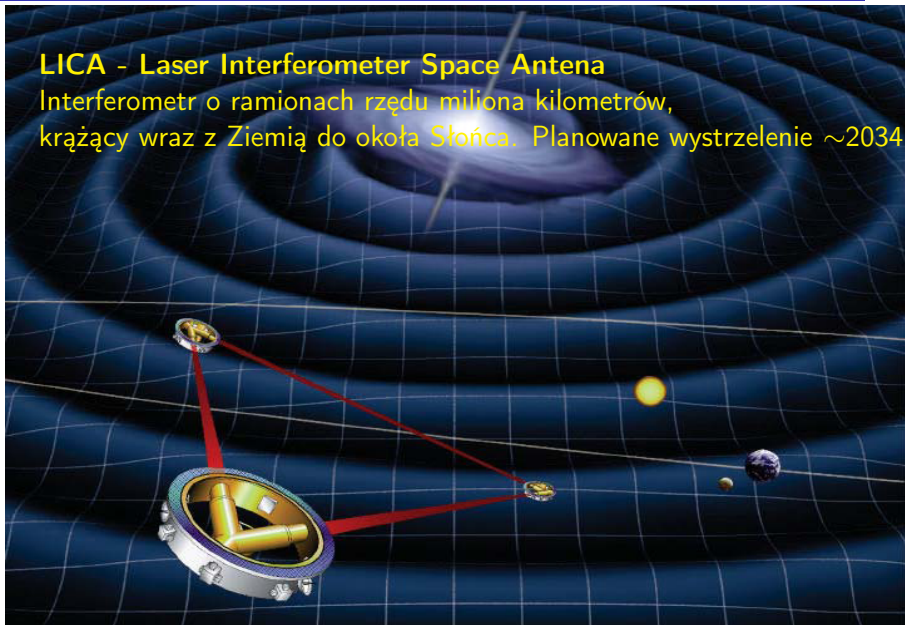
Teleskop Einsteina (Eintein Telescope - ET)

ramiona o długości 10 km, 6 interferometrów, uruchomienie ~ 2030



LICA - Laser Interferometer Space Antena

Interferometr o ramionach rzędu miliona kilometrów,
krążący wraz z Ziemią dookoła Słońca. Planowane wystrzelenie ~2034



Detekcja fal grawitacyjnych była **przełomowym odkryciem**.

Nagroda Nobla 2017

W krótkim czasie **fale grawitacyjne**, w przeszłości często traktowane jako hipotetyczne i niemożliwe do zmierzenia (jak neutrino) “awansowały” do roli **ważnego narzędzia** badania otaczającego nas Wszechświata i procesów w nim zachodzących.

⇒ Nowa era w astronomii/astrofizyce...

Detekcja fal grawitacyjnych była **przełomowym odkryciem**.

Nagroda Nobla 2017

W krótkim czasie **fale grawitacyjne**, w przeszłości często traktowane jako hipotetyczne i niemożliwe do zmierzenia (jak neutrino) “awansowały” do roli **ważnego narzędzia** badania otaczającego nas Wszechświata i procesów w nim zachodzących.

⇒ Nowa era w astronomii/astrofizyce...

Jesteśmy na początku nowego etapu badań.

Może pomiary fal grawitacyjnych dostarczą nam odpowiedzi na niektóre z nurtujących nas pytań, np. natury ciemnej materii lub ciemnej energii...