

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Fale grawitacyjne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



18 stycznia 2022

Termin

- 25 stycznia 2022 (wtorek), godz. 15:15-16:45 (godziny wykładu)

Informacje szczegółowe

- na platformie Kampus, tak jak testy wykładowe
30 pytań wielokrotnego wyboru (jedna odpowiedź poprawna)
przykładowe pytania są udostępnione na stronie wykładu
- Czas przeznaczony na pisanie 90 minut
- O zaliczeniu wykładu decyduje suma punktów z testu końcowego i połowy punktów z testów wykładowych

Zaliczenie

Warunkiem zaliczenia jest

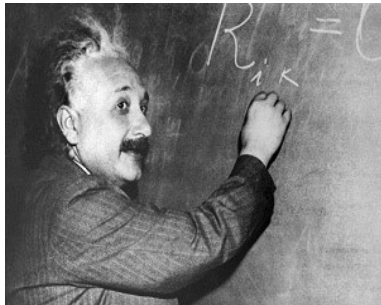
- Uzyskanie minimum 50% punktów z testów
- Obecność na wykładzie (potwierdzona testem lub ew. na zoom)
więcej niż 3 nieusprawiedliwione nieobecności \Rightarrow obniżona ocena

- 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.

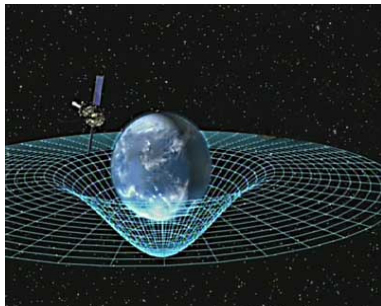
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



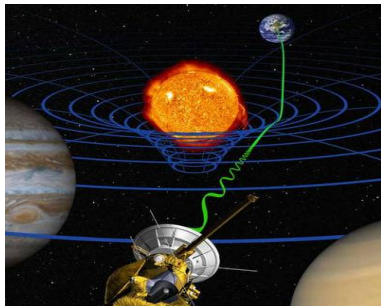
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

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!

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.

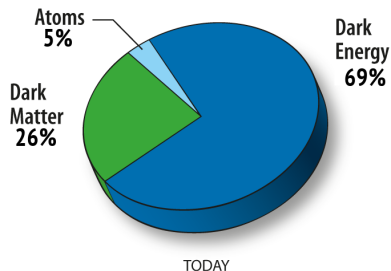
Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

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: $T = 13.787 \pm 0.020$ Gyr

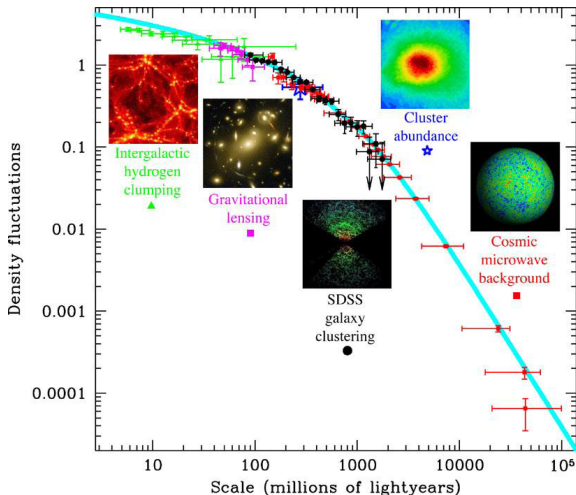
Model Λ CDM

Model kosmologiczny uwzględniający:

stałą kosmologiczną (Λ) i Zimną Ciemną Materię (Cold Dark Matter - CDM)

bardzo dobrze opisuje fluktuacje gęstości Wszechświata na różnych skalach odległości.

Wszechświat możemy traktować jako jednorodny i izotropowy tylko na największych skalach...



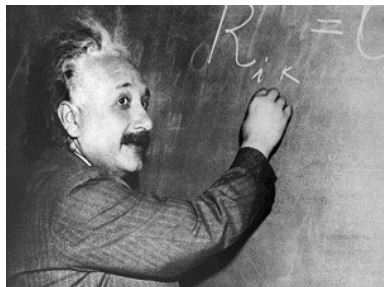
- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

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”

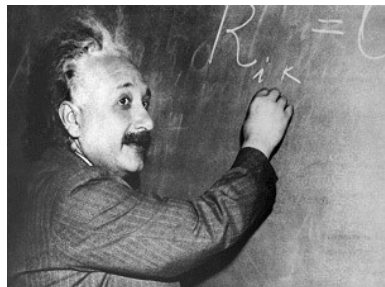
Zakładamy, że na bardzo dużych odległościach Wszechświat jest **jednorodny i izotropowy**.

Ale co się dzieje na **mniej**skich skalach?

Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...

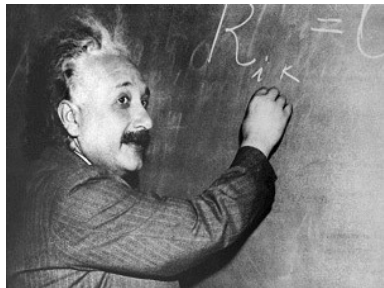
Na “małych” skalach odległości **Wszechświat** nie tylko **nie jest jednorodny**, ale też **nie jest statyczny**.

Gdy mówimy o galaktykach i gromadach galaktyk, musimy uwzględnić ich wewnętrzną dynamikę, oddziaływania i ruch obiektów...



Ogólna Teoria Względności opisuje grawitację także na mniejszych skalach: **lokalne deformacje czasoprzestrzeni** i ich wpływ na ruch obiektów.

Jednym z pierwszych sukcesów OTW było opisanie precesji orbity Merkurego, której teoria Newtona nie tłumaczyła...

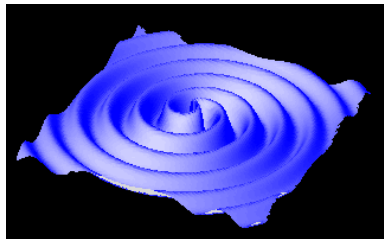


Ogólna Teoria Względności opisuje grawitację także na mniejszych skalach: **lokalne deformacje czasoprzestrzeni** i ich wpływ na ruch obiektów.

Jednym z pierwszych sukcesów OTW było opisanie precesji orbity Merkurego, której teoria Newtona nie tłumaczyła...

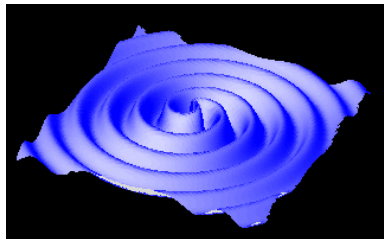
Jakościowo **nowe zjawisko** pojawia się, gdy próbujemy opisać zaburzenia czasoprzestrzeni wywoływane przez **poruszające się obiekty**.

To tak jak przejście od elektrostatyki do elektrodynamiki...



Ogólna Teoria Względności opisuje grawitację także na mniejszych skalach: **lokalne deformacje czasoprzestrzeni** i ich wpływ na ruch obiektów.

Jednym z pierwszych sukcesów OTW było opisanie precesji orbity Merkurego, której teoria Newtona nie tłumaczyła...



Jakościowo **nowe zjawisko** pojawia się, gdy próbujemy opisać zaburzenia czasoprzestrzeni wywoływane przez **poruszające się obiekty**.

To tak jak przejście od elektrostatyki do elektrodynamiki...

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

Tylko fale grawitacyjne są **dużo, dużo słabsze**...

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

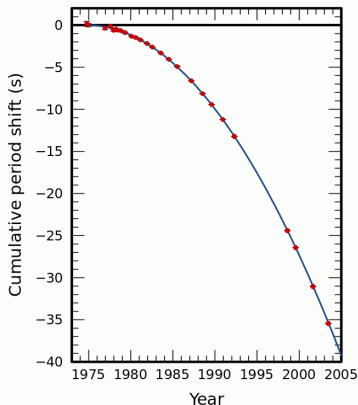
⇒ pulsar krąży dookoła innej gwiazdy w układzie podwójnym (okres 7.75 h)

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. \Rightarrow przyspieszenie ładunków

Możliwe źródła

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

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
- (niesymetryczny) wybuch masywnego obiektu

Możliwe źródła

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

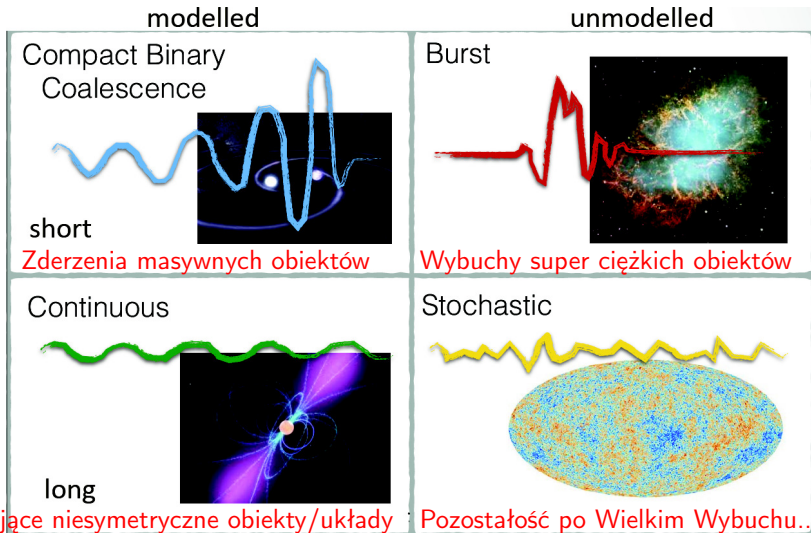
Podobnie możemy rozważać wiele różnych źródeł fal grawitacyjnych.

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

Aby emisja fal grawitacyjnych była istotna, musimy mieć:

- duże masy
- małe rozmiary obiektów/małe odległości między obiektami
- duże prędkości (porównywalne z prędkością światła)

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 ich wykrycie było tak trudne

Przechodząca fala grawitacyjna nie powoduje ruchu obiektów !

Mogłaby co najwyżej wprawiać obiekty w drgania rezonansowe, gdyby częstość drgań własnych odpowiadała częstości fali...

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 ich wykrycie było tak trudne

Przechodząca fala grawitacyjna nie powoduje ruchu obiektów !

Mogłaby co najwyżej wprawiać obiekty w drgania rezonansowe, gdyby częstość drgań własnych odpowiadała częstości fali...

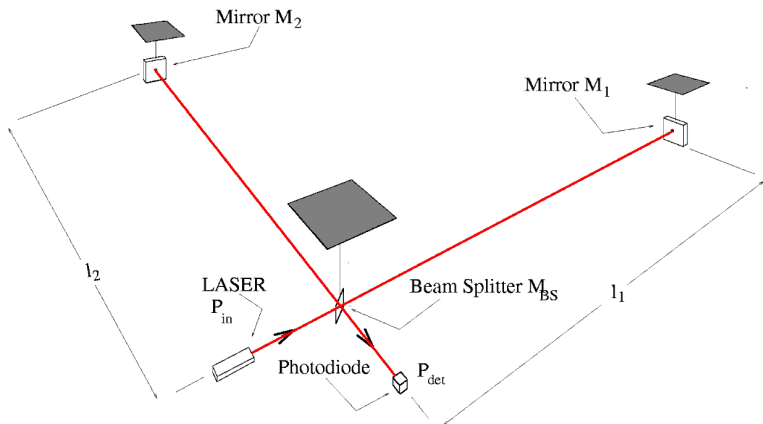
Powoduje deformację przestrzeni \Rightarrow zmianę odległości między obiektami
 \Rightarrow pomiary interferometryczne

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

Interferometry

Idea: powtórzenie eksperymentu Michelsona-Morleya

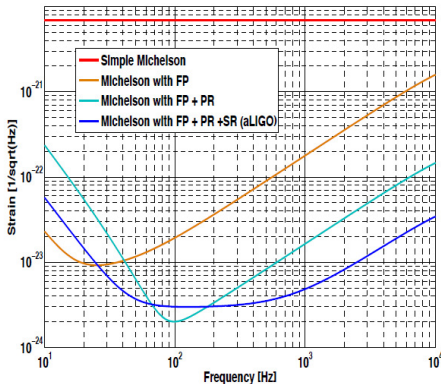
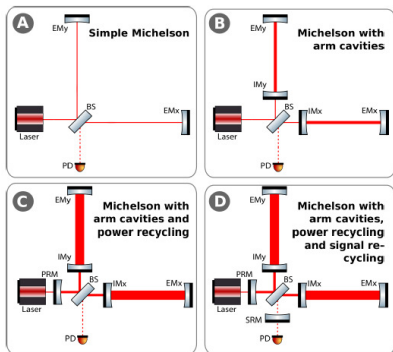
Szukamy periodycznych zmian czasu propagacji (prędkości światła)



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

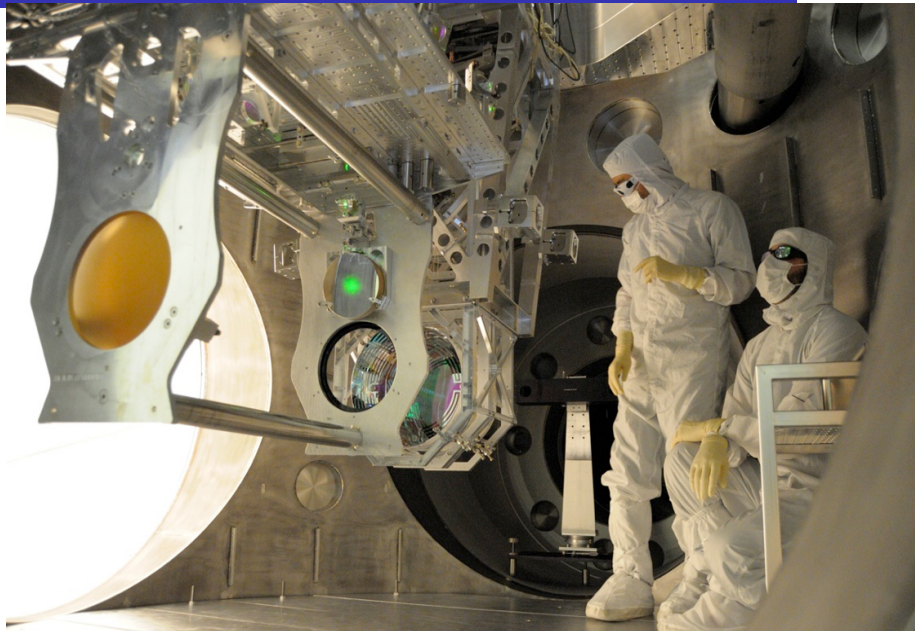


LIGO (Hanford, USA) ramiona o długości 4 km



LIGO (Livingston, USA) ramiona o długości 4 km

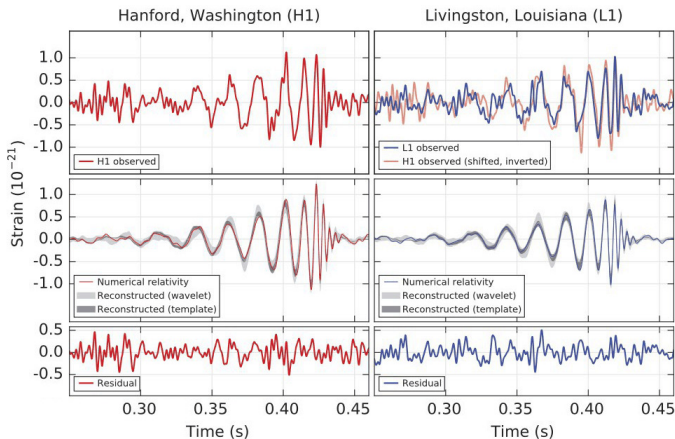




- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

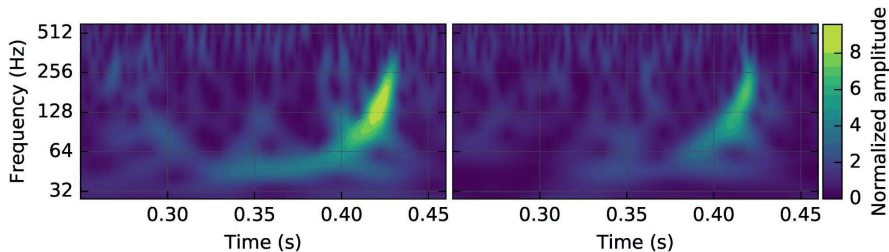
Odkrycie

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



Odkrycie

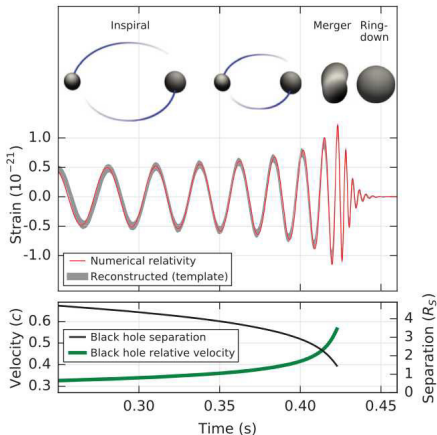
Badzo silny sygnał, wyraźnie widoczny na rozkładzie czas-częstość



Oczekiwany poziom tła dla tego natężenia sygnału:

1 przypadek na 203'000 lat !

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:

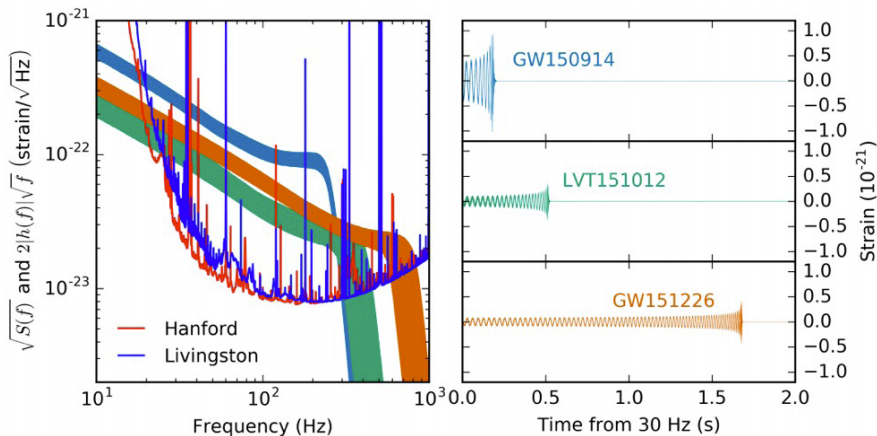
$$d = 410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

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

Dobra zgodność z OTW

Wyniki LIGO 2015

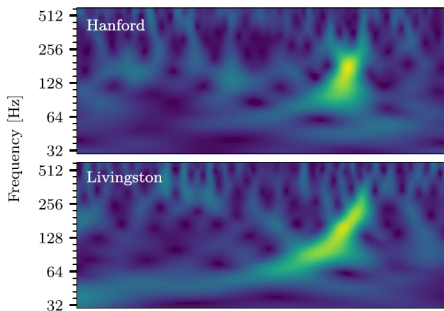
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w 2015: jeden “pewny” (GW151226) i jeden “kandydat” (LVT151012)



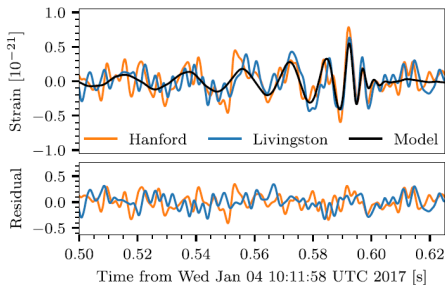
Przypadek 2017 Zaprezentowany 1 czerwca 2017

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

Widmo częstotliwości

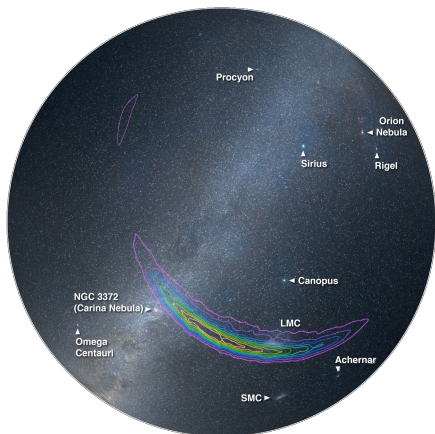
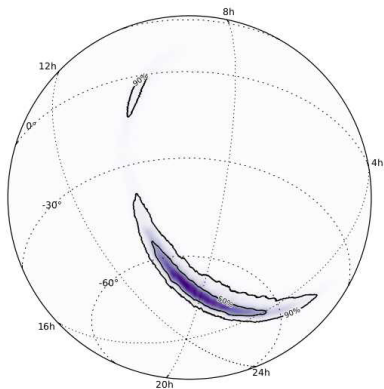


Dopasowanie wzorca



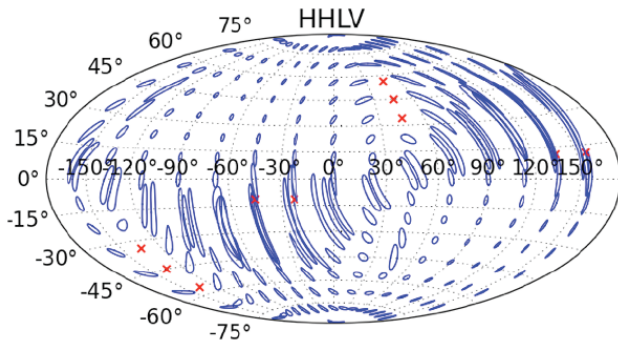
Położenie GW150914

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



Położenie źródła

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



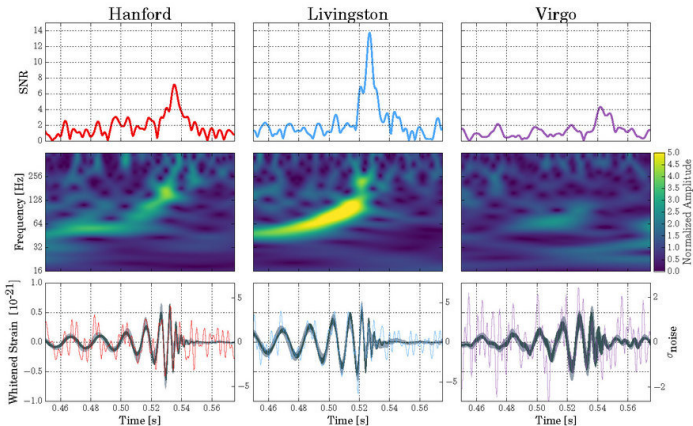
Fairhurst 2011

Red crosses denote
regions where the
network has blind spots

10

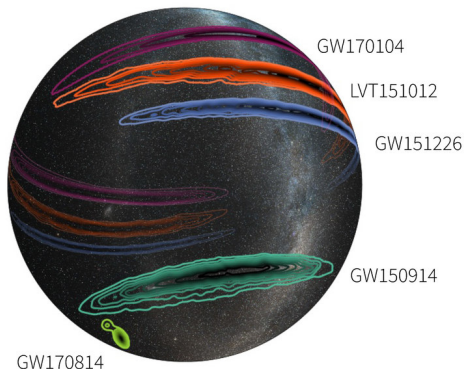
GW170814 Potrójna detekcja

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



GW170814 Potrójna detekcja

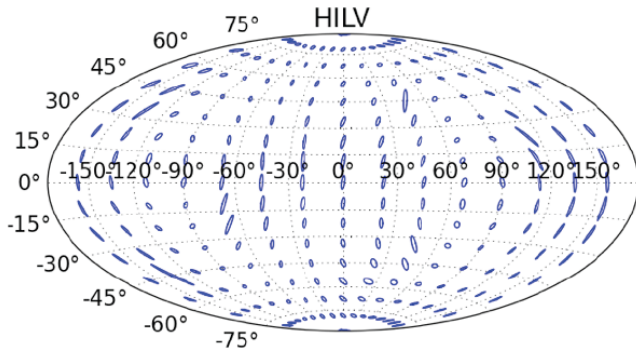
Detekcja przez trzy interferometry daje dużo dokładniejszą lokalizację!



Lokalizacja kluczowa, żeby móc poszukiwać innych sygnałów...

Położenie źródła

Jeszcze dokładniejsze wyznaczenie pozycji źródła będzie możliwe po uruchomieniu LIGO-India (budowa rozpoczęta w lutym 2016)



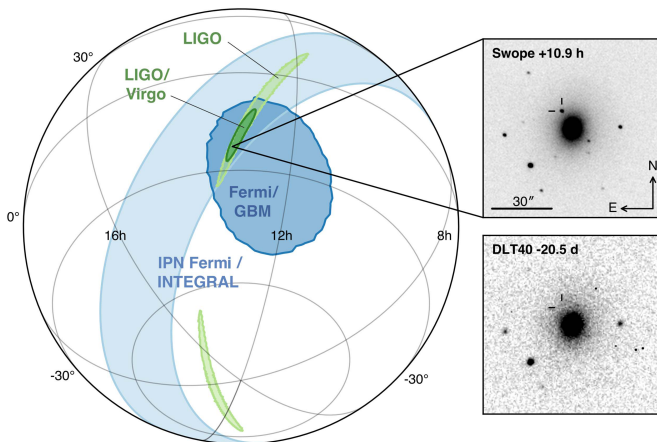
Fairhurst 2011

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

GW170817

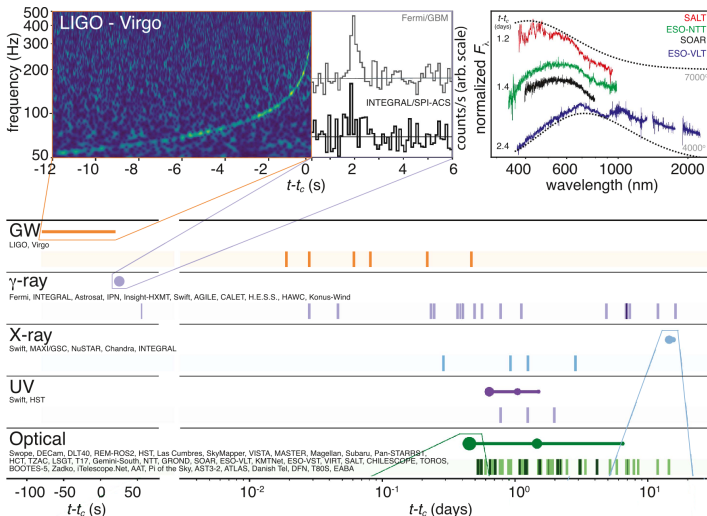
LIGO i Virgo działały razem tylko przez miesiąc. Ale udało się zaobserwować dwa impulsy fal grawitacyjnych (!).

Drugi z nich był wyjątkowy! Zobaczyły go także inne eksperymenty !...



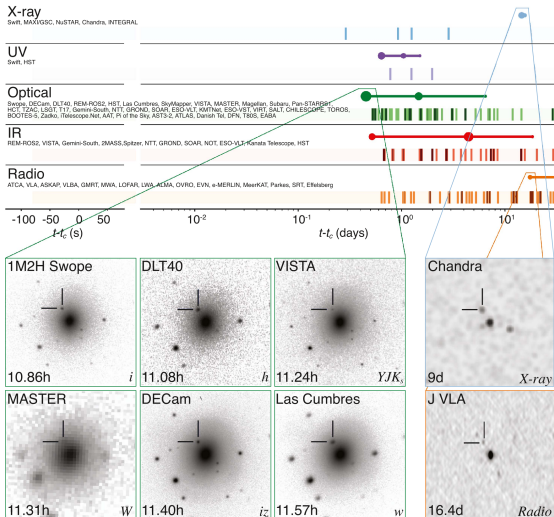
GW170817

Jednocześnie z impulsem grawitacyjnym zaobserwowano błysk gamma...



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...**

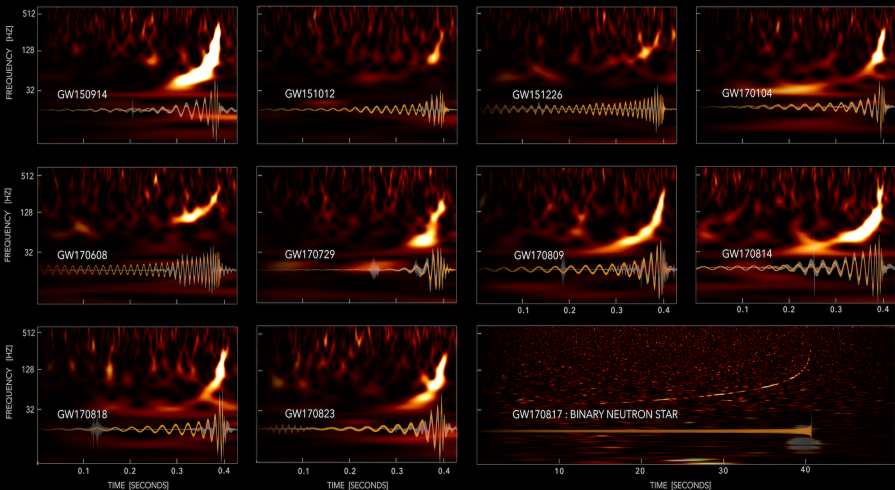
Sam wybuch trwał ok. 60 sekund, ale wyrzucone z ogromną prędkością strugi materii oddziaływały z materią międzygwiazdową jeszcze przez wiele tygodni emitując promieniowanie rentgenowskie, optyczne, radiowe...

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} ...

GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



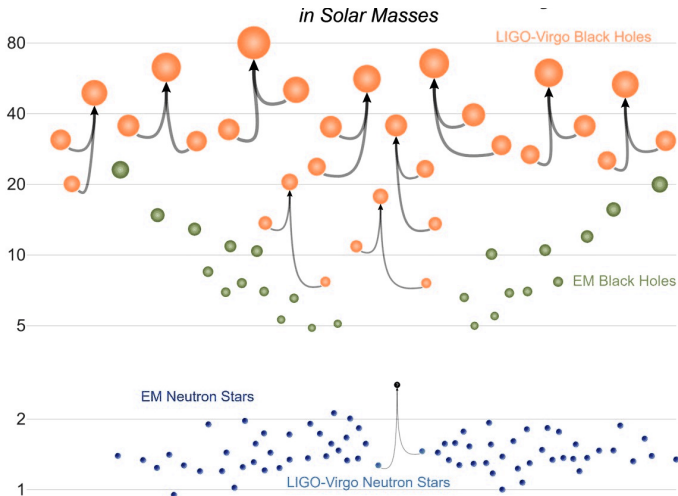
LIGO-VIRGO DATA: [HTTPS://DOI.ORG/10.7935/82H3-HH23](https://doi.org/10.7935/82h3-hh23)

WAVELET (UNMODELED)

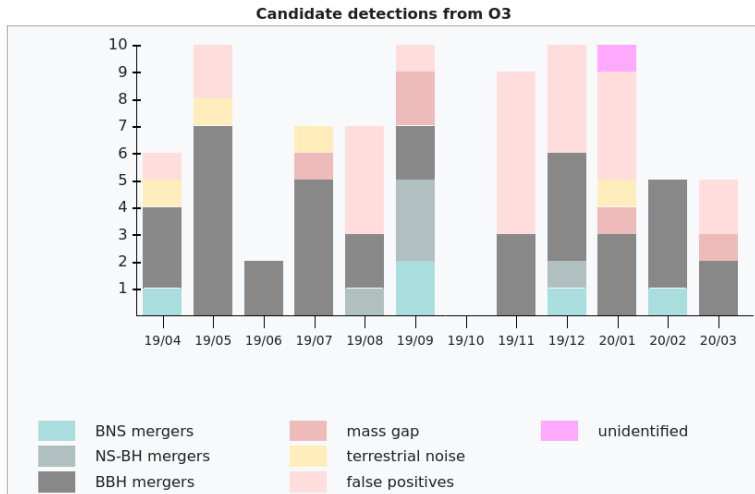
EINSTEIN'S THEORY

S. GHONGE, K. JANI | GEORGIA TECH

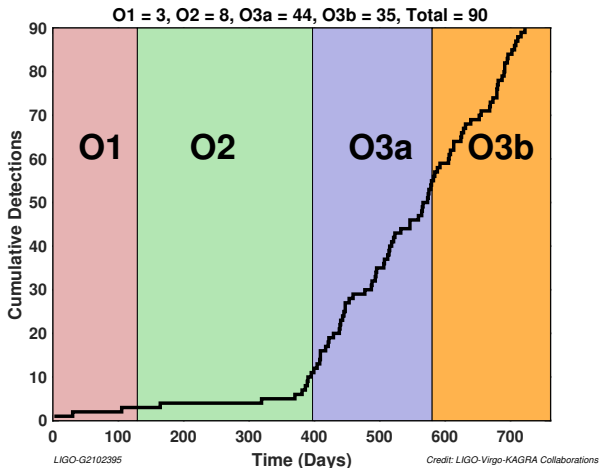
Widmo mas czarnych dziur O1+O2 (2015-2017)



Detektory LIGO i Virgo rozpoczęły kolejny okres zbierania danych (O3) w kwietniu 2019, do marca 2020 zaobserwowano około 80 “kandydatów” różnego typu:

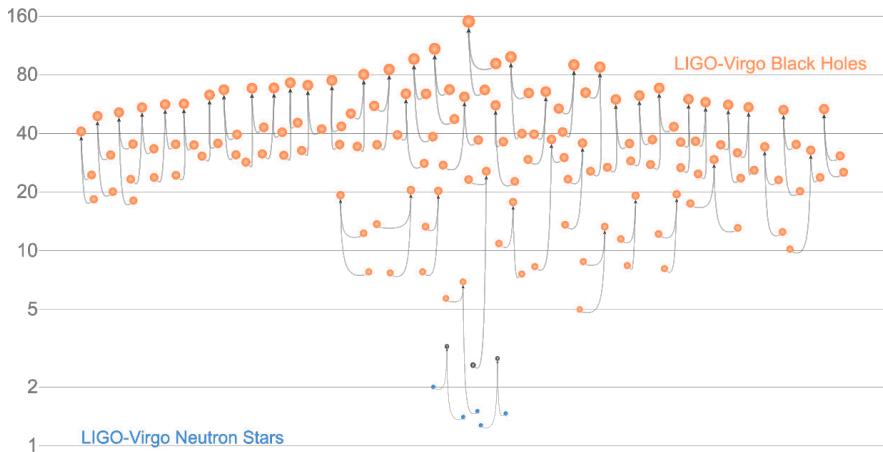


Dalsze modernizacje detektorów przed rozpoczęciem O3 dodatkowo zwiększyły ich czułość (\Rightarrow zasięg obserwacji). Niestety zbieranie danych przerwane przez pandemię...



Widmo mas czarnych dziur O1+O2+O3 (2015-2020)

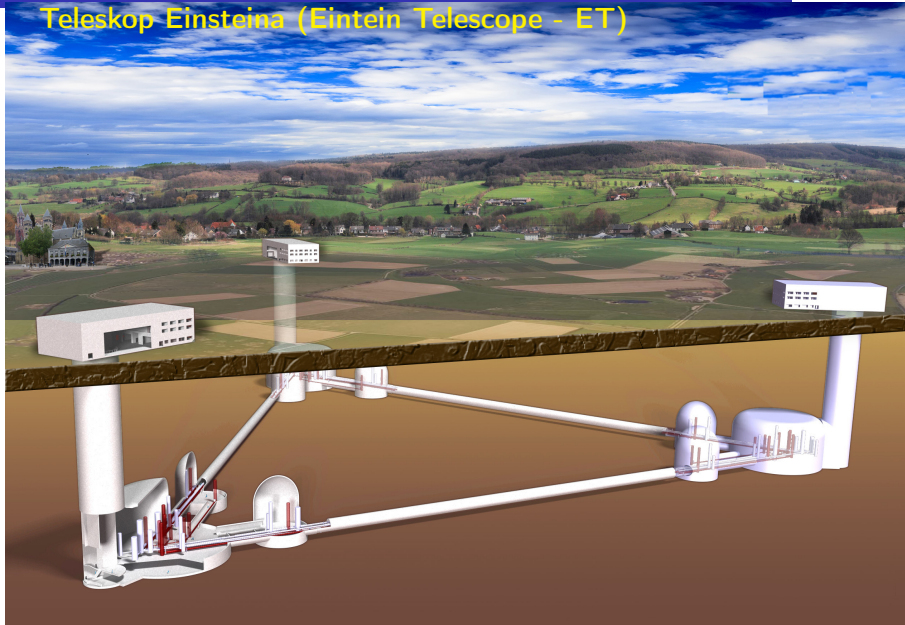
in Solar Masses



GWTC-2 plot v1.0

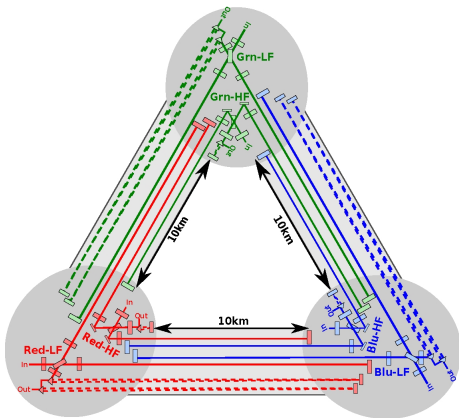
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

Teleskop Einsteina (Eintein Telescope - ET)



Teleskop Einsteina

Eintein Telescope - ET



Ramiona o długości 10 km.

W każdej parze ramion znajdować się będą dwa interferometry:

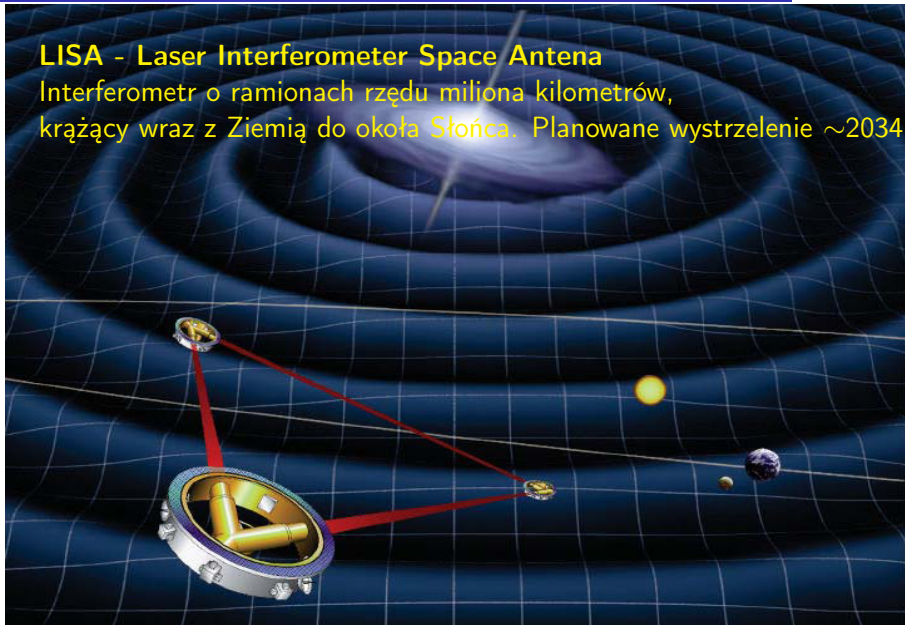
- niskiej częstotliwości - LF (zimny)
- wysokiej częstotliwości - HF (ciepły)

Łącznie 6 niezależnych interferometrów.

Decyzja o finansowaniu powinna zapadnąć wkrótce (do 2020?)

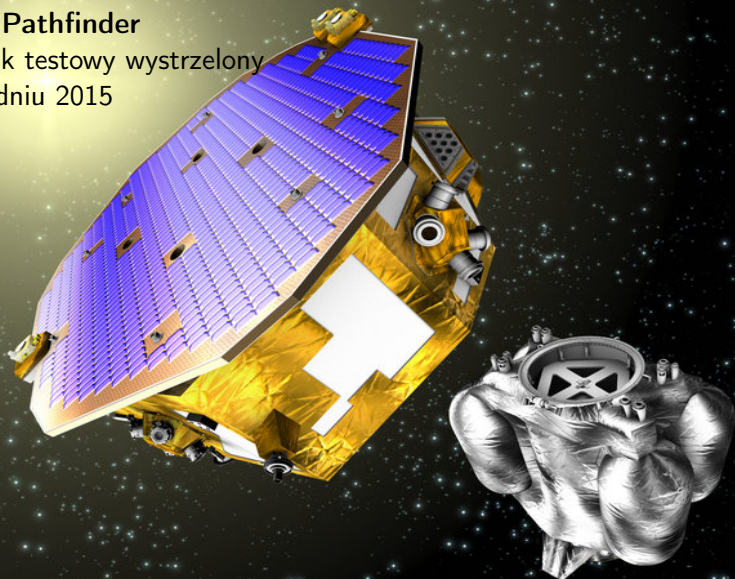
- ⇒ produkcja elementów ~ 2020
- ⇒ rozpoczęcie instalacji ~ 2025
- ⇒ zbierania danych ~ 2030

LISA - Laser Interferometer Space Antena
Interferometr o ramionach rzędu miliona kilometrów,
krążący wraz z Ziemią dookoła Słońca. Planowane wystrzelenie ~2034



LISA Pathfinder

próbnik testowy wystrzelony
w grudniu 2015



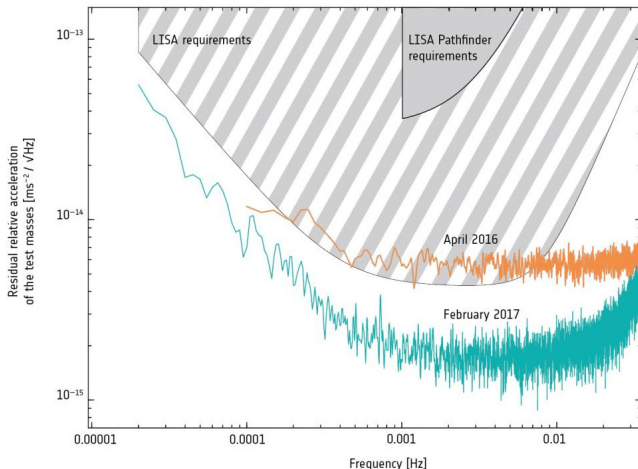
LISA Pathfinder

próbnik testowy wystrzelony
w grudniu 2015



Pojedynczy interferometer o długości ramion... 38 cm

LISA Pathfinder wyniki pomiarów zakończonych w lipcu 2017



Uzyskana stabilność działania interferometru znacznie lepsza od oczekiwań!
Lepsza nawet niż docelowe wymagania dla projektu LISA...

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. **Mamy już 90 potwierdzonych obserwacji**.

⇒ 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. **Mamy już 90 potwierdzonych obserwacji**.

⇒ 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...

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. **Mamy już 90 potwierdzonych obserwacji.**

⇒ 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...

Po kolejnej modernizacji LIGO i Virgo, wraz z japońskim detektorem KAGRA mają rozpocząć kolejny cykl zbierania danych w grudniu 2022...