

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Fale grawitacyjne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



14 stycznia 2025

Termin podstawowy

- 21 stycznia 2025 (wtorek), godz. 15:15-16:45 (termin ostatniego wykładu)

Informacje szczegółowe

- na platformie Kampus, tak jak testy wykładowe (zdalnie, nie przychodzimy na uczelnię!)
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
- Systematyczny udział w wykładach (potwierdzony testami wykładowymi) więcej niż 3 nieusprawiedliwione nieobecności \Rightarrow możliwe obniżenie oceny

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

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

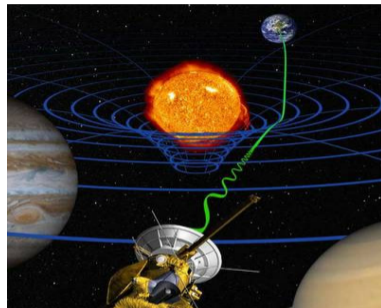
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**

Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu "swobodnej" materii

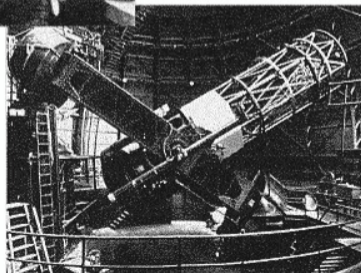
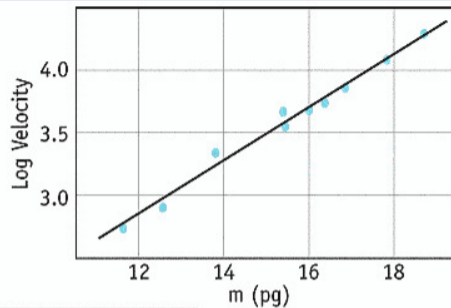
Najłatwiej to zrozumieć dla **światła**: porusza się ono po trajektorjach odpowiadających **najmniejszej odległości** (najszybszej propagacji) między dwoma zadanymi punktami.

W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!





Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

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 "zawieszone" są poszczególne obiekty.

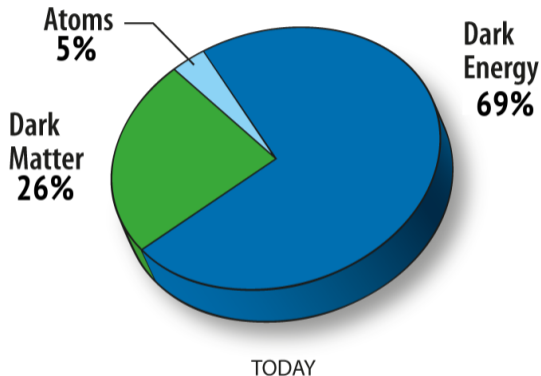
Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

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 tzw. **stałą kosmologiczną (Λ)**



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

Wiek Wszechświata: $T = 13.787 \pm 0.020$ Gyr

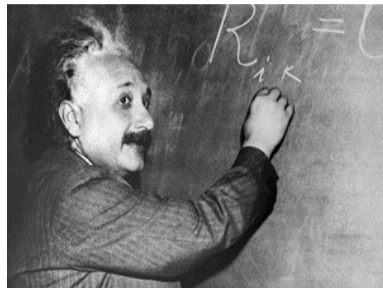
- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817
- 5 Perspektywy badań

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”

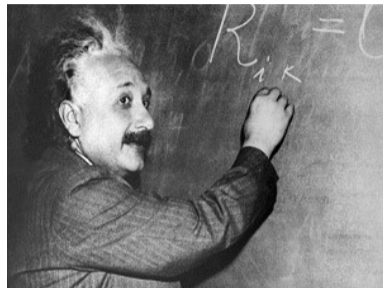
Zakładamy, że na bardzo dużych odległościach Wszechświat jest **jednorodny i izotropowy**.

Ale co się dzieje na **mniejszych skalach**?

Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...

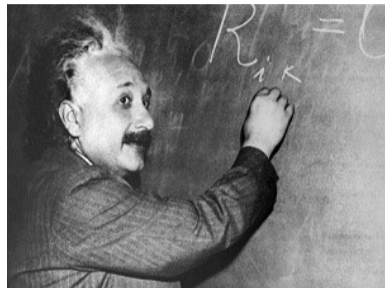
Na “małych” skalach **Wszechświat** nie tylko **nie jest jednorodny**, ale też **nie jest statyczny**.

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



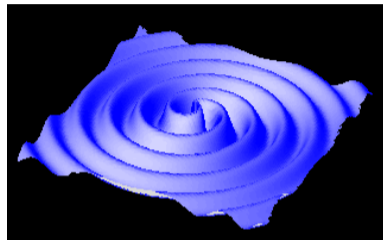
Ogólna Teoria Względności opisuje grawitację także na mniejszych skalach: **lokalne deformacje czasoprzestrzeni** i ich wpływ na ruch obiektów.

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...

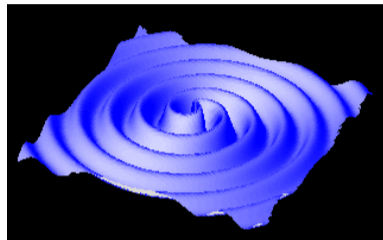


Jakościowo **nowe zjawisko** pojawia się, gdy próbujemy opisać zaburzenia czasoprzestrzeni wywoływane przez **poruszające się obiekty**.

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 fale E-M). Tylko fale grawitacyjne są **dużo, dużo słabsze**...

Pierwsza detekcja pośrednia

W 1974 Joseph Taylor i Russell Hulse odkryli pulsar [PSR 1913+16](#).

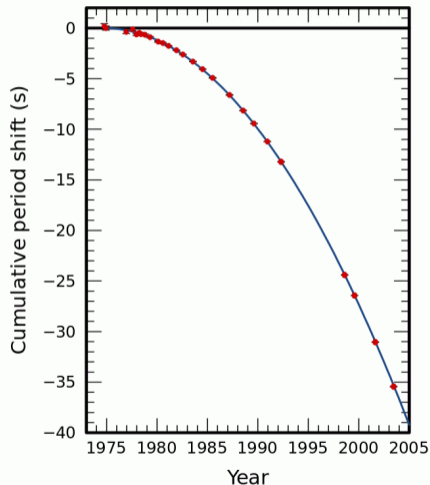
Zauważyli regularne zmiany w jego okresie pulsacji (59 ms), które wynikały z efektu Dopplera

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

Długoczasowe obserwacje pokazały, że okres obiegu się skraca ⇒ układ [wiruje coraz szybciej](#)
⇒ [gwiazdy zbliżają się do siebie !](#)

⇒ straty energii powodowane [emisją fal grawitacyjnych](#)

Wyniki obserwacji w bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami OTW ⇒ [Nobel 1993](#)



Możliwe źródła

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

Podobnie możemy rozważyć 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), zderzenia cząstek (np. promieniowanie rentgenowskie), przejścia atomowe i jądrowe, itp. \Rightarrow przyspieszenie ładunków

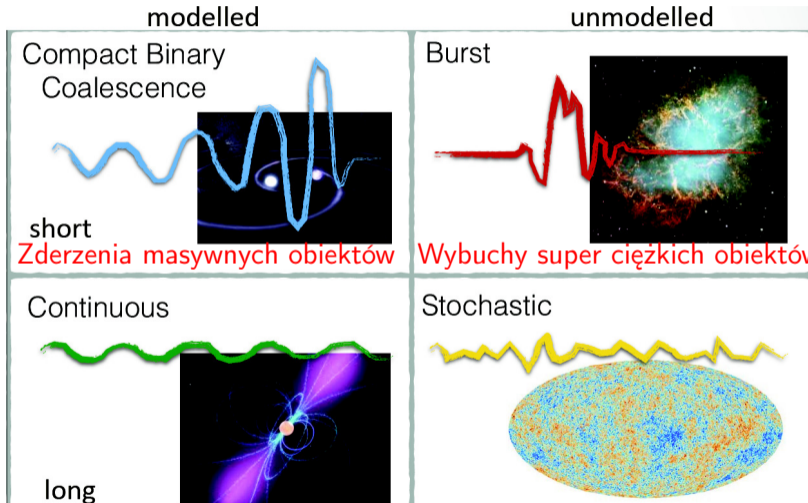
Podobnie możemy rozważyć wiele różnych źródeł fal grawitacyjnych.

- 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 zauważalna, musimy mieć:

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

Możliwe źródła



Zderzenia masywnych obiektów

Wybuchy super ciężkich obiektów

Wirujące niesymetryczne obiekty/układy

Pozostałość po Wielkim Wybuchu...

Własności

Fale grawitacyjne zachowują się podobnie do fal elektromagnetycznych:

- poruszają się z tą samą prędkością, **prędkością 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 absorbcji w materii

⇒ 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, **prędkością 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 absorbcji w materii
⇒ 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 ⇒ **zmianę odległości** między obiektami

Najdokładniejsza metoda pomiaru (zmian) odległości ⇒ **pomiary interferometryczne**

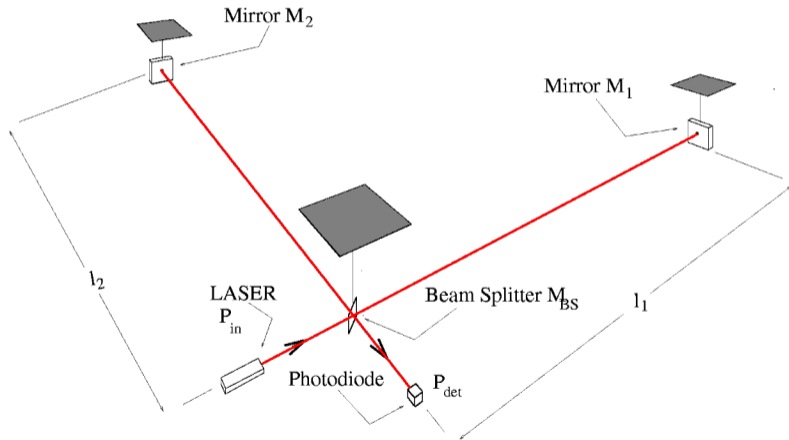
- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych**
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817
- 5 Perspektywy badań

Interferometry

Ogólna idea:
powtórzenie eksperymentu
Michelsona-Morleya

Szukamy periodycznych zmian
czasu propagacji światła w
ramionach interferometru

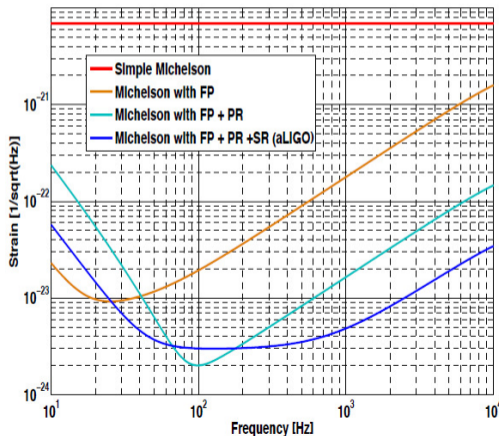
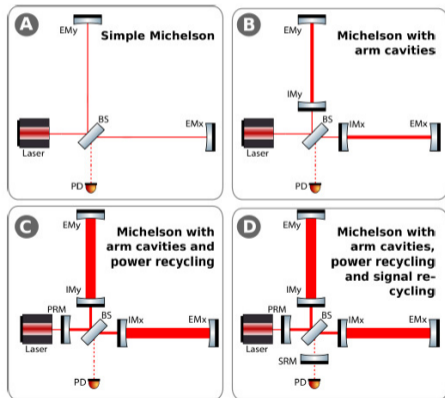
Zmianę długości ramion można
też opisać jako zmianę
prędkości światła



Interferometry

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

⇒ wykorzystujemy wnęki rezonansowe, które pozwalają wydłużyć drogę impulsów światła



VIRGO (Włochy) ramiona o długości 3 km

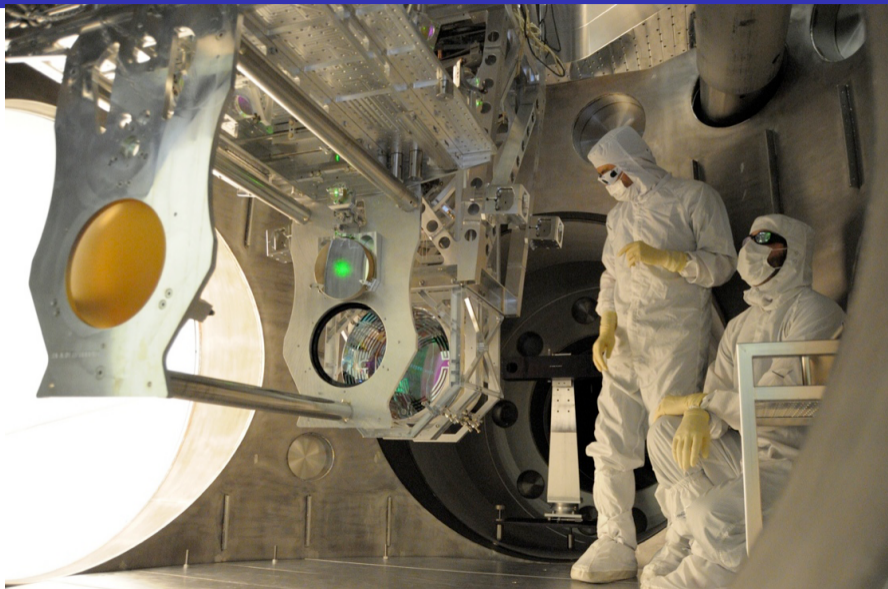


LIGO (Hanford, USA) ramiona o długości 4 km



LIGO (Livingston, USA) ramiona o długości 4 km

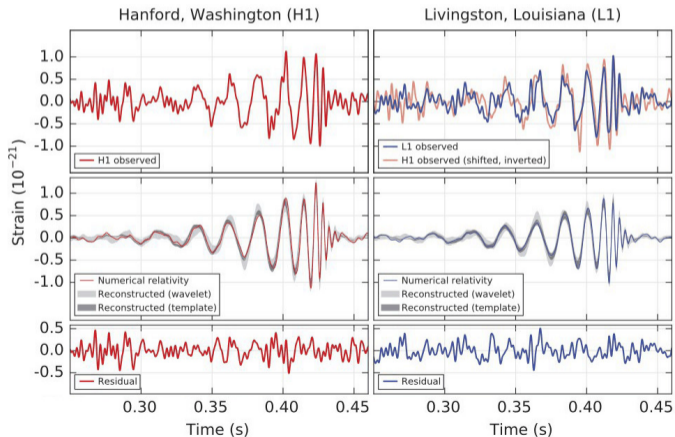




- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych**
- 4 GW170817
- 5 Perspektywy badań

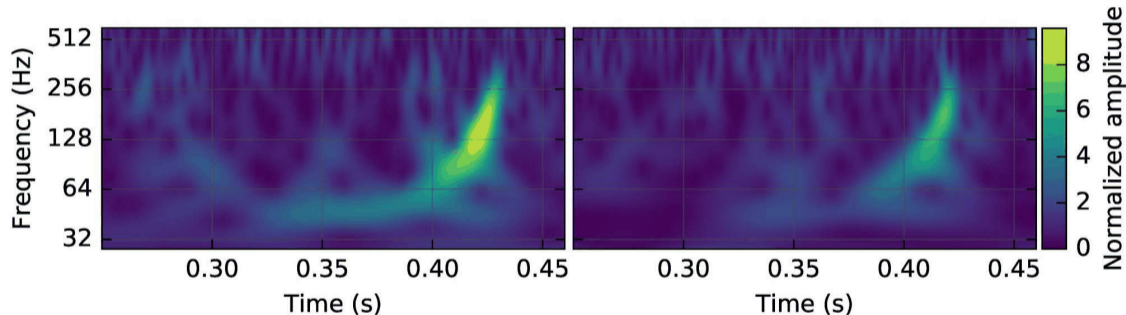
Odkrycie

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



Odkrycie

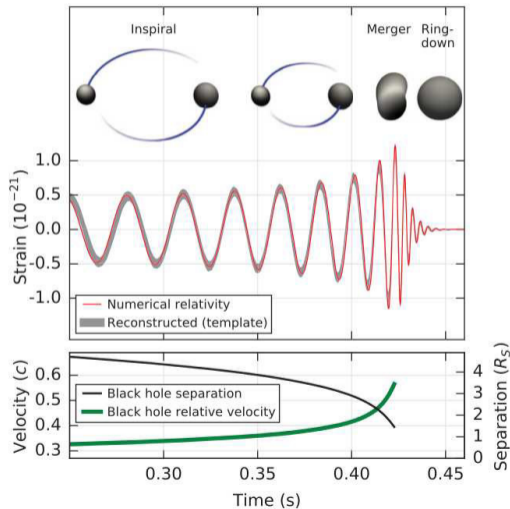
Badzo silny sygnał, wyraźnie widoczny na rozkładzie czas-częstość amplitudy drgań



Oczekiwany poziom tła dla tego natężenia sygnału:

1 przypadek na 203'000 lat !

GW150914 został zidentyfikowany jako **złanie 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:

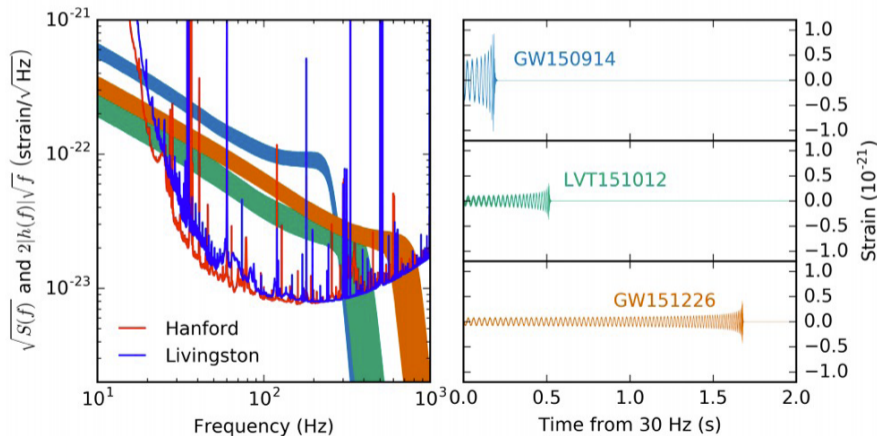
$$d = 410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

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

Dobra zgodność z OTW

Wyniki LIGO 2015

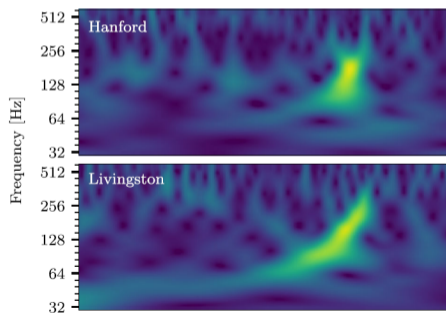
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w 2015: jeden "pewny" (GW151226) i jeden "kandydat" (LVT151012)



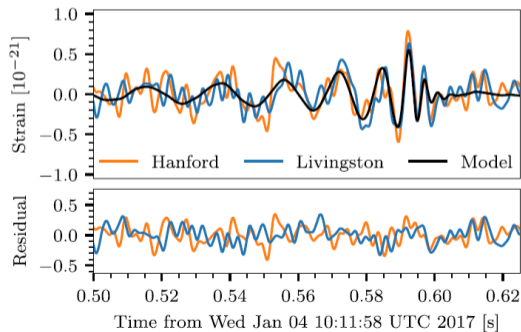
Przypadek 2017 Zaprezentowany 1 czerwca 2017

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

Widmo częstości

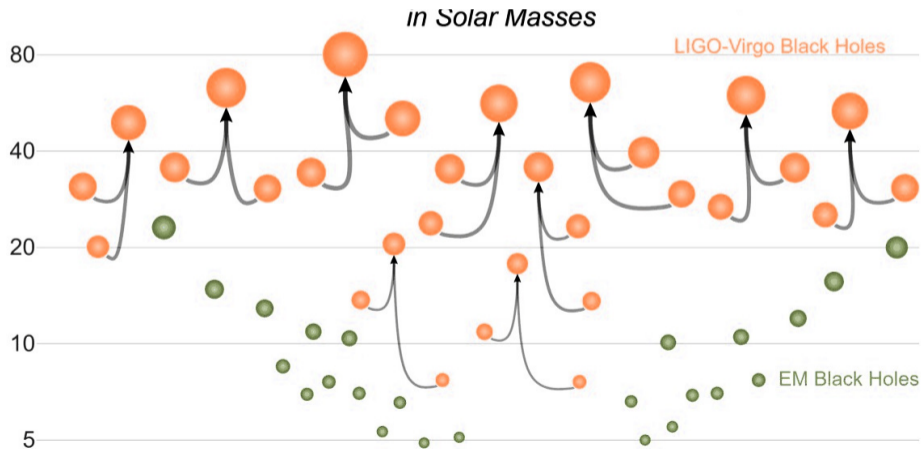


Dopasowanie wzorca



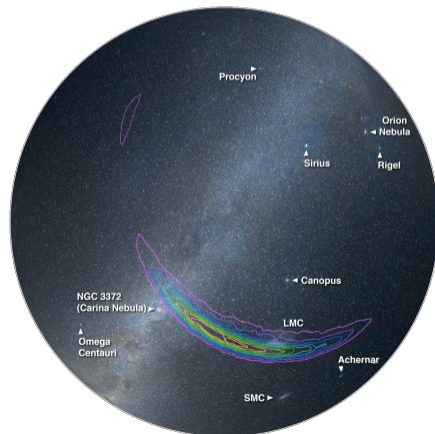
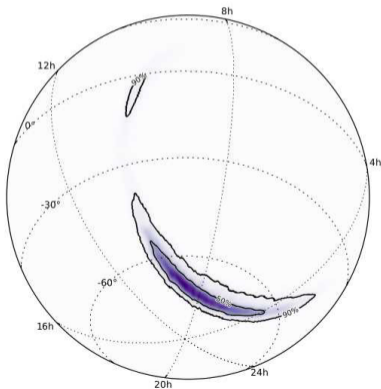
Widmo mas czarnych dziur (2015-2017)

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



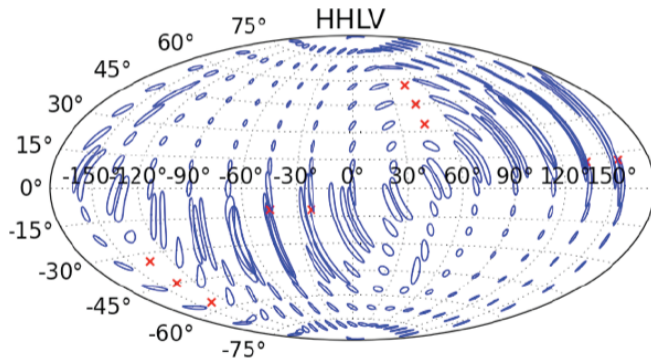
Położenie GW150914

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



Położenie źródła

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

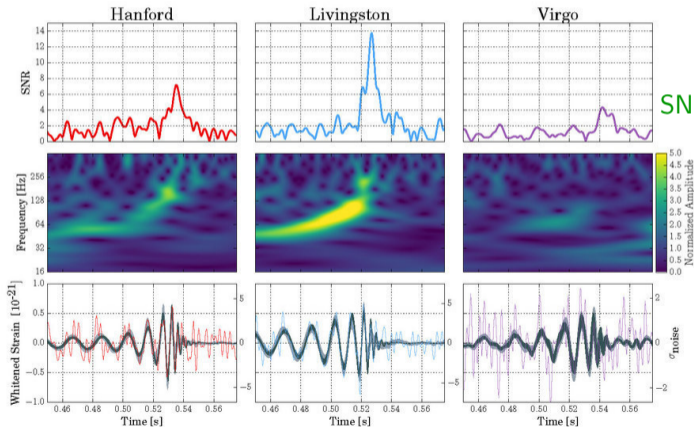


Fairhurst 2011

Red crosses denote regions where the network has blind spots

GW170814 Potrójna detekcja

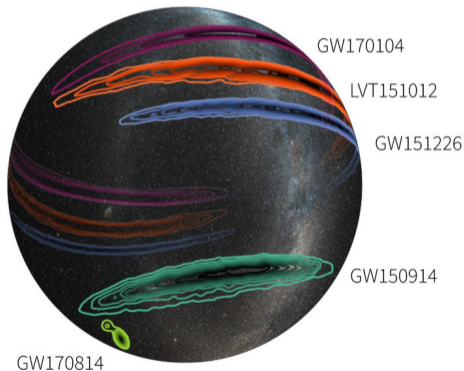
W 2017 roku, LIGO i Virgo działały razem tylko przez miesiąc...
Ale udało się zaobserwować dwa impulsy fal grawitacyjnych (!).



SNR: signal to noise ratio

GW170814 Potrójna detekcja

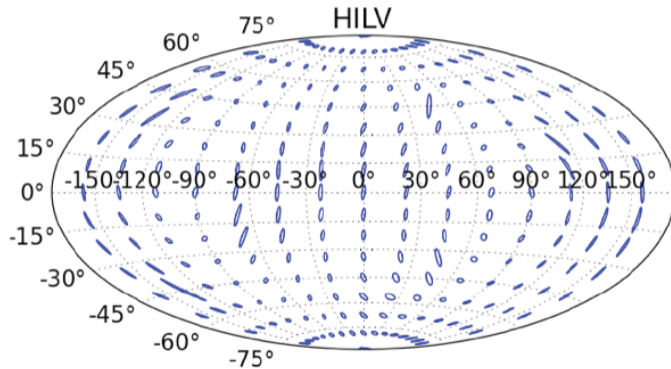
Detekcja przez trzy interferometry daje dużo dokładniejszą lokalizację!



Lokalizacja kluczowa, żeby móc poszukiwać innych sygnałów...

Położenie źródła

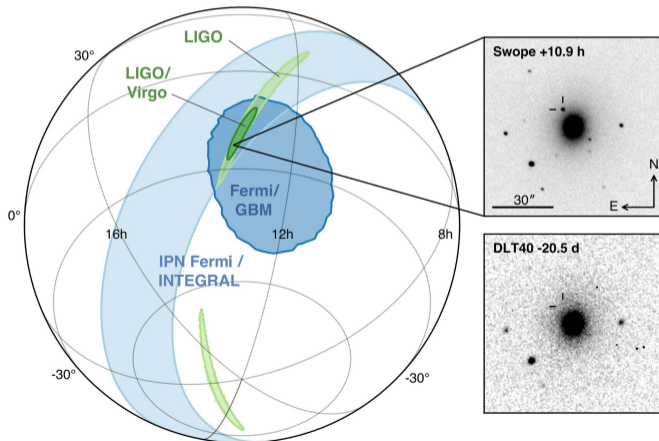
Jeszcze dokładniejsze wyznaczenie pozycji źródła stanie się możliwe po uruchomieniu kolejnych detektorów (KAGRA w Japonii, LIGO-India)



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

GW170817

W 2017 roku LIGO i Virgo działały razem przez miesiąc i udało się zaobserwować dwa impulsy fal grawitacyjnych. **Drugi z nich był wyjątkowy! Zobaczyły go także inne eksperymenty!...**

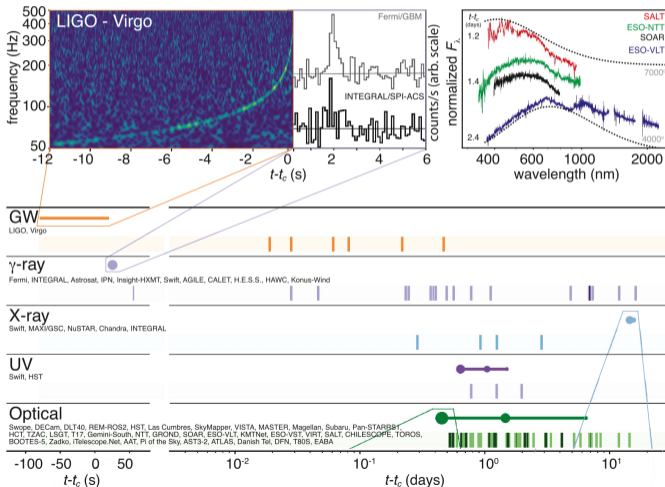


Następniej nocy

Poprzedniej nocy

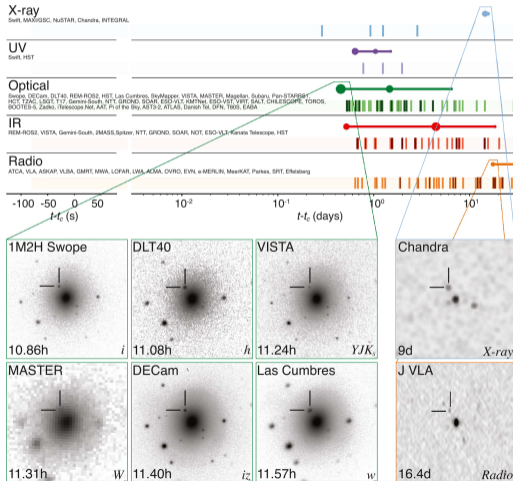
GW170817

Jednocześnie z impulsem grawitacyjnym zaobserwowano błysk w promieniowaniu gamma...



GW170817

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



GW170817

Analiza wyników obserwacji wskazuje 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 był w galaktyce NGC4993 i miał miejsce ok. **100 milionów lat temu...**

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

Obserwacje potwierdzają m.in., że w tego typu wybuchach produkowane są pierwiastki cięższe niż żelazo, takie jak ołów, złoto, platyna...

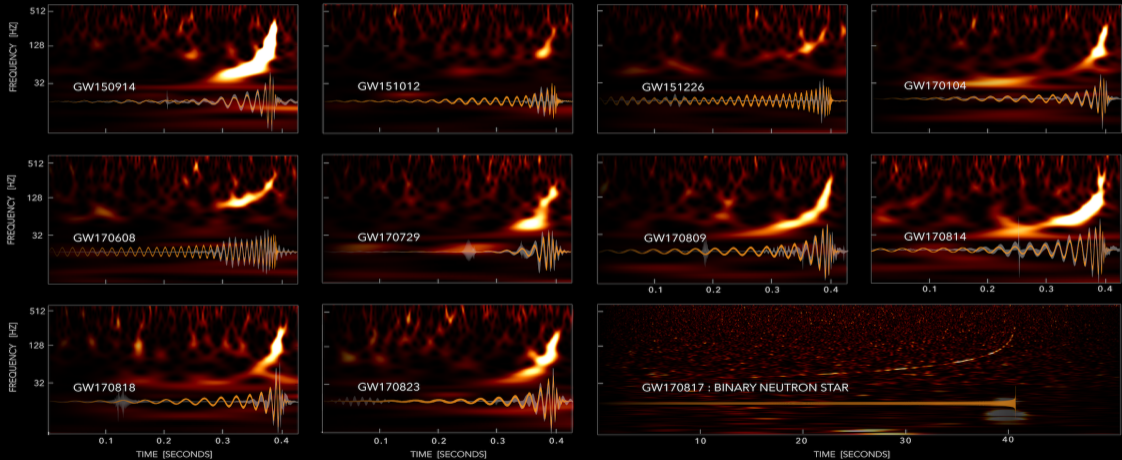
W reakcjach termojądrowych w gwiazdach produkowane są tylko pierwiastki do żelaza...

Potwierdziliśmy także przewidywania Ogólnej Teorii Względności.

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

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

GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



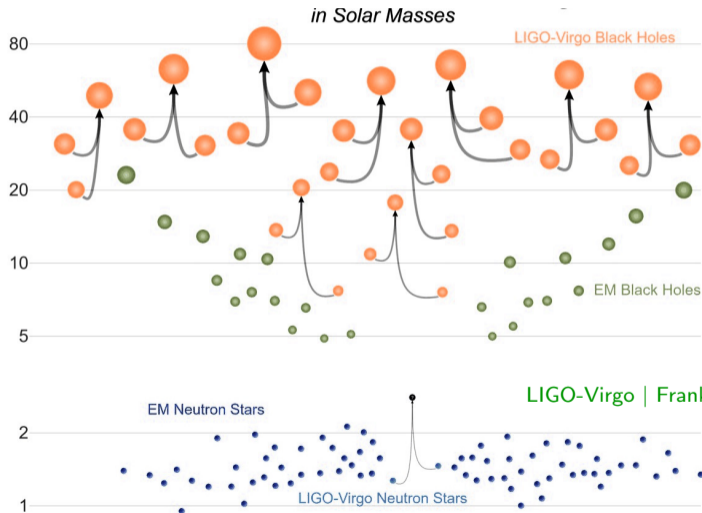
LIGO-VIRGO DATA: [HTTPS://DOI.ORG/10.7935/82H3-HH23](https://doi.org/10.7935/82H3-HH23)

WAVELET (UNMODELED)

EINSTEIN'S THEORY

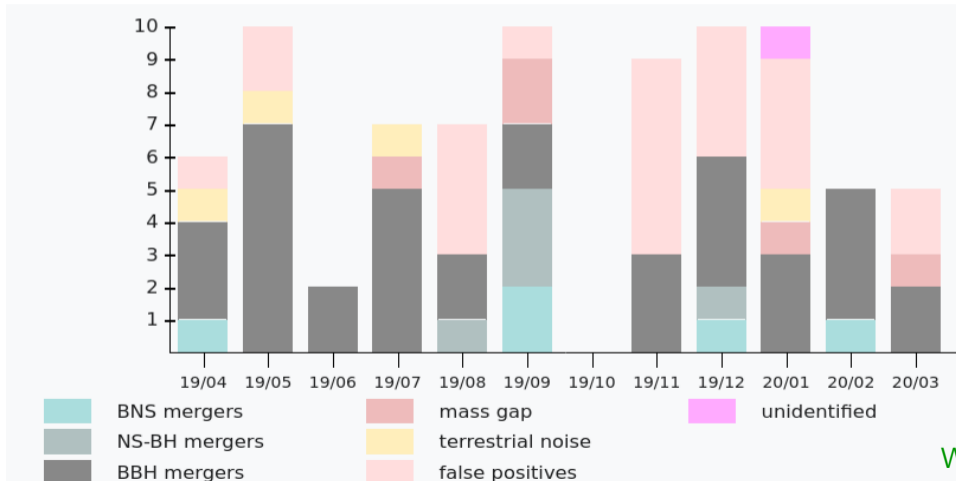
S. GHONGE, K. JANI | GEORGIA TECH

Widmo mas czarnych dziur i gwiazd neutronowych

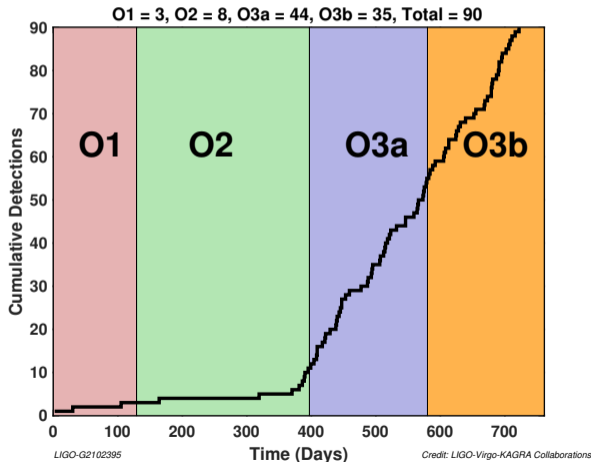


LIGO-Virgo | Frank Elavsky | Northwestern

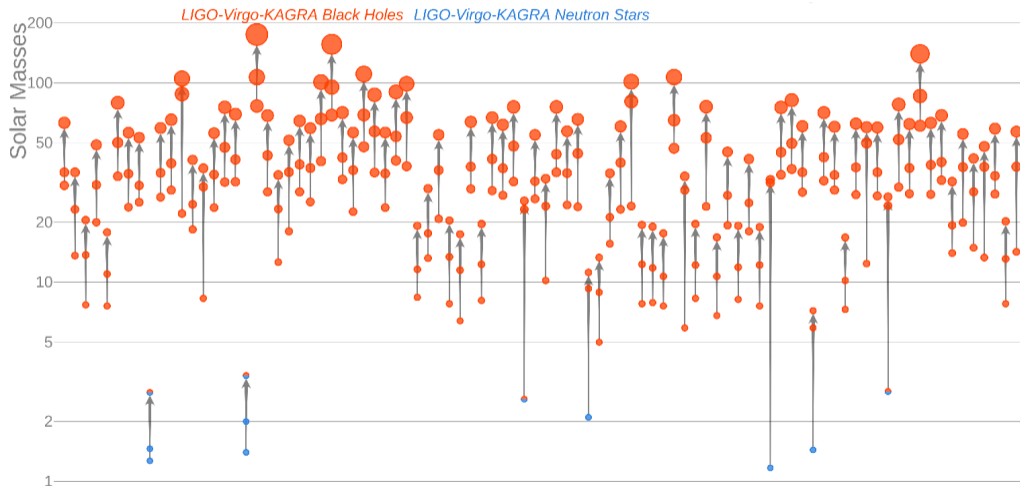
Detektory LIGO i Virgo rozpoczęły kolejny okres zbierania danych (O3) w kwietniu 2019, w 2020 dołączył japoński detektor KAGRA, zaobserwowano kolejnych 80 “kandydatów”:

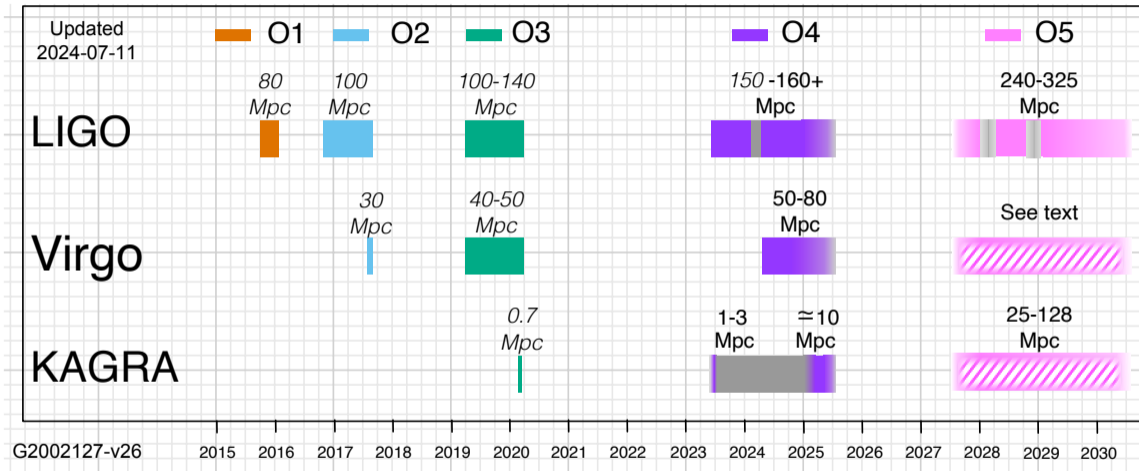


Dalsze modernizacje detektorów przed rozpoczęciem O3 dodatkowo zwiększyły ich czułość (\Rightarrow zasięg obserwacji). Niestety zbieranie danych przerwane przez pandemię...



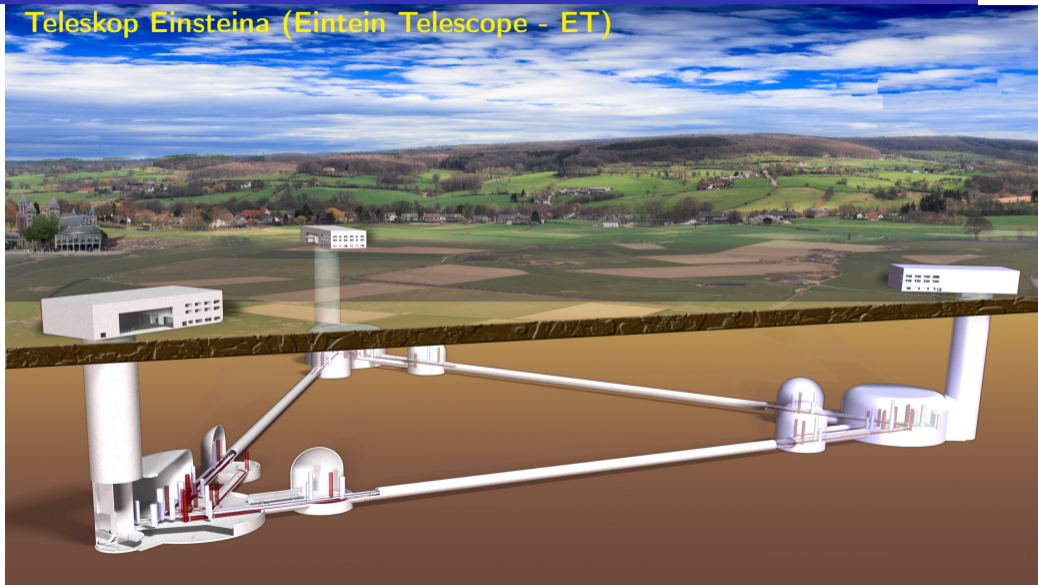
Widmo mas czarnych dziur O1+O2+O3 (2015-2020)



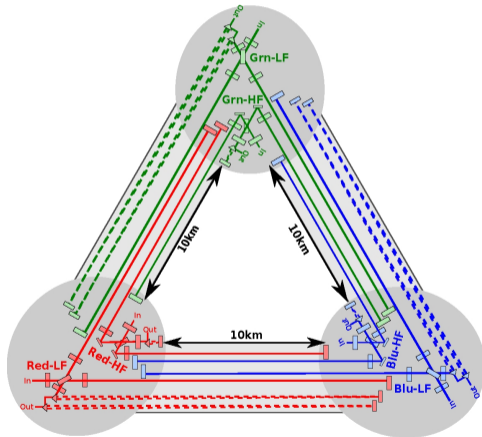


Po trzyletniej przerwie, w runie O4, zaobserwowano już około 250 przypadków...

Teleskop Einsteina (Einstein Telescope - ET)



Teleskop Einsteina Eintein Telescope - ET



Ramiona o długości 10 km.

W każdej parze dwa interferometry:

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

Łącznie 6 niezależnych interferometrów.

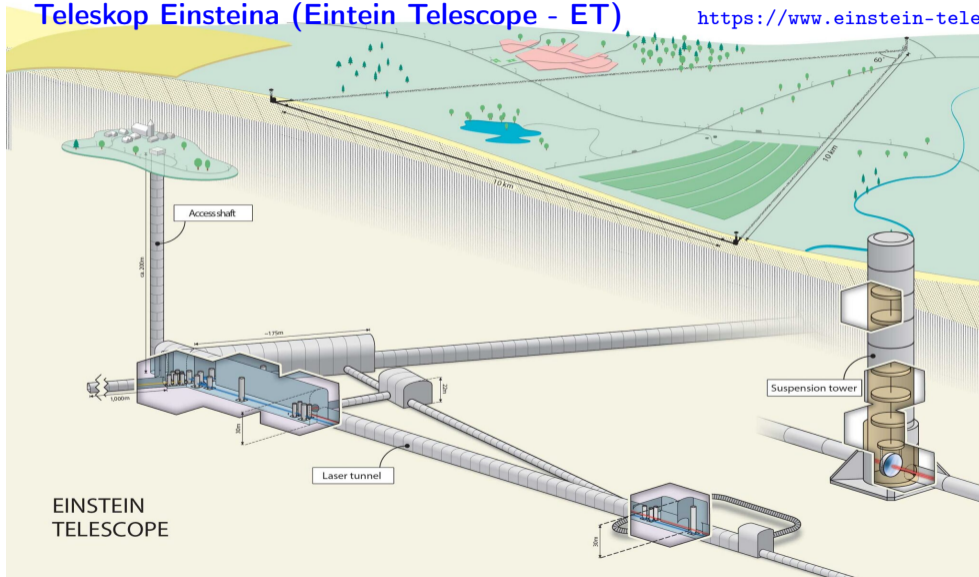
W 2021 wpisany na europejską "mapę drogową"...
Przewidywany koszt to ok. 2 mld. EUR !

- ⇒ wybór lokalizacji ~ 2025
- ⇒ rozpoczęcie instalacji ~ 2030
- ⇒ zbierania danych ~ 2035

Ale zapewne potrwa to dużo dłużej...

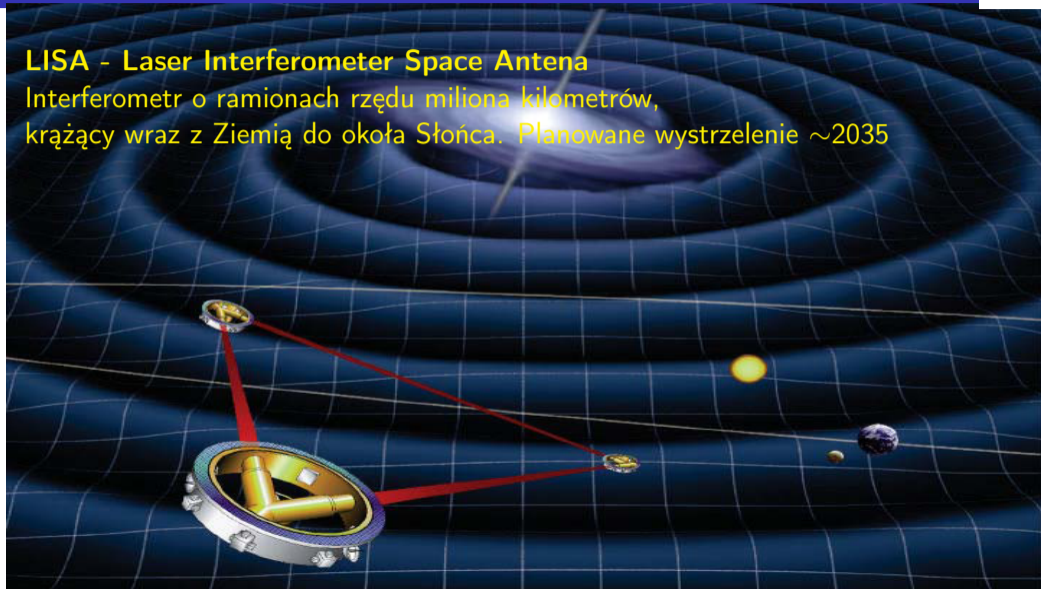
Teleskop Einsteina (Einstein Telescope - ET)

<https://www.einstein-teleskop.de/>



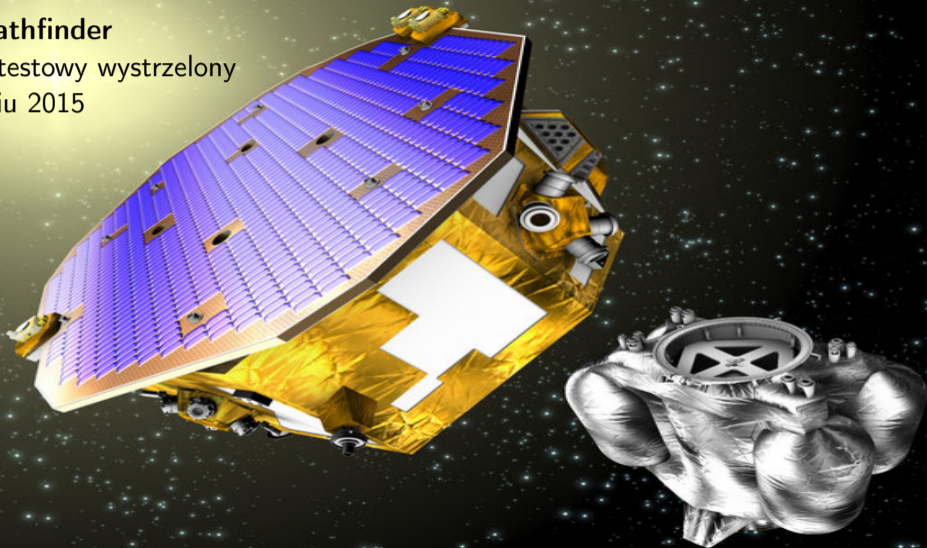
LISA - Laser Interferometer Space Antena

Interferometr o ramionach rzędu miliona kilometrów,
krążący wraz z Ziemią dookoła Słońca. Planowane wystrzelenie ~2035



LISA Pathfinder

próbnik testowy wystrzelony
w grudniu 2015



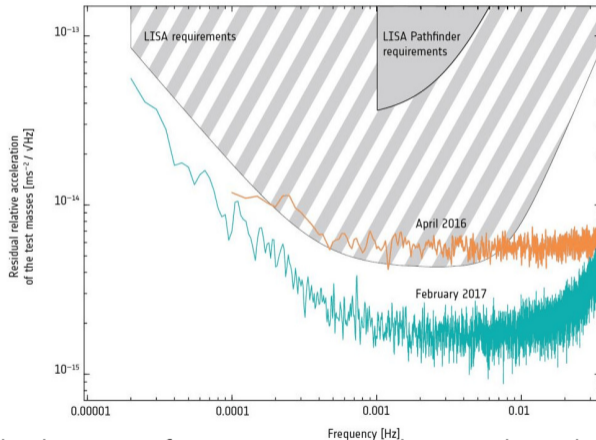
LISA Pathfinder

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 ponad 300 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 ponad 300 potwierdzonych obserwacji.

⇒ **Nowa era w astronomii/astrofizyce...**

Nie analizujemy już tylko pojedynczych obserwacji, szukamy opisu statystycznego...

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 ponad 300 potwierdzonych obserwacji.

⇒ **Nowa era w astronomii/astrofizyce...**

Nie analizujemy już tylko pojedynczych obserwacji, szukamy opisu statystycznego...

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

W latach 2025-2027 planowana jest kolejna modernizacja LIGO, Virgo i KAGRA, w kolejnym okresie O5 (od 2027) powinniśmy już rejestrować tysiące przypadków...