

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład XIV

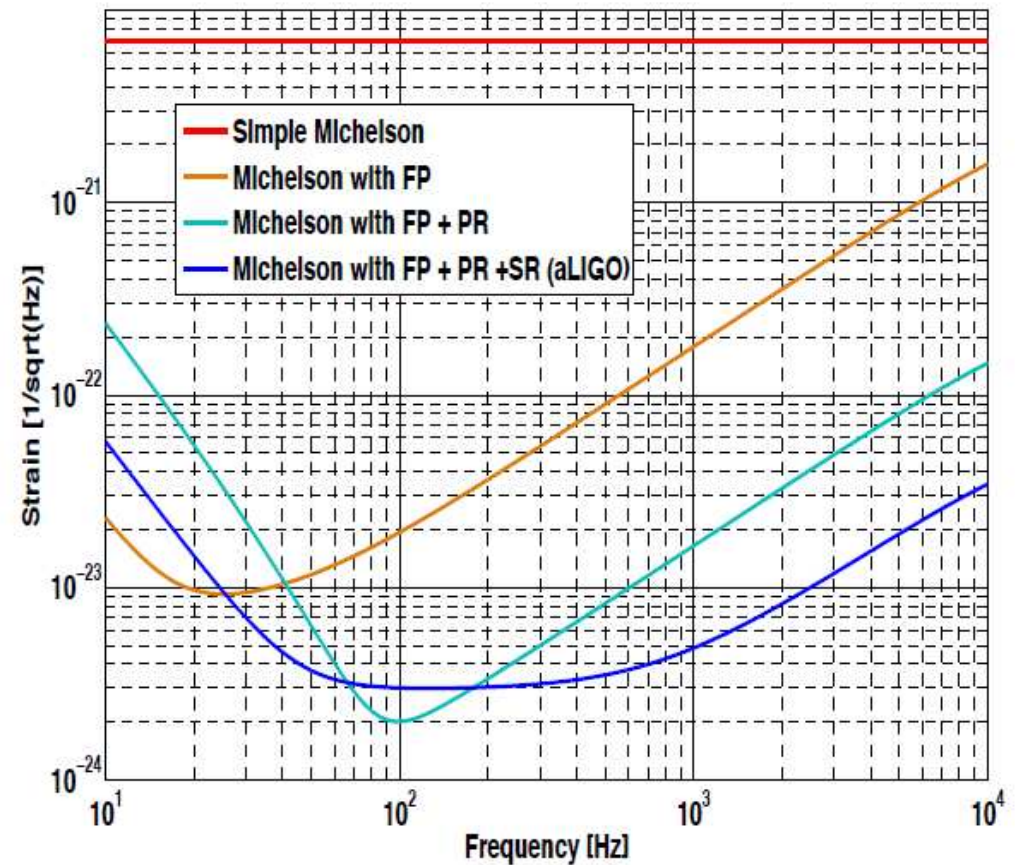
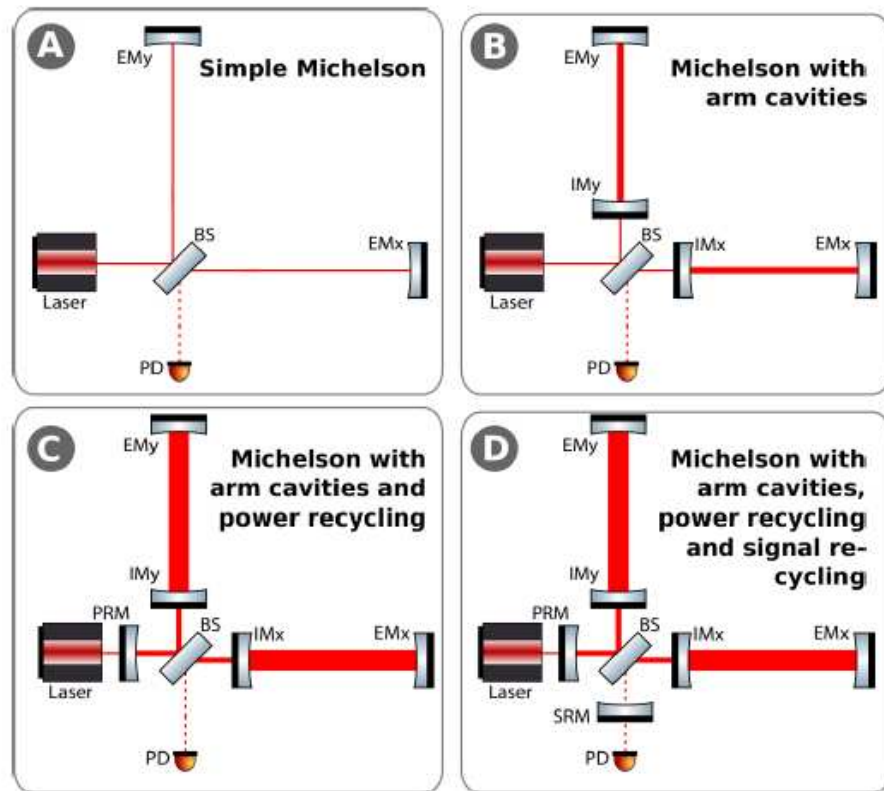
- GW150914 i kolejne obserwacje LIGO-Virgo
- GW170817 i co w nim takiego szczególnego
- Perspektywy badań

Detekcja fal grawitacyjnych

Interferometry

Bardzo prosta idea: powtórzenie doświadczenia Michelson'a-Morley'a

Konieczne dla precyzji pomiaru: wnęki rezonansowe (L) i eliminacja straty mocy (P_{in})



VIRGO (Włochy)



LIGO Hanford (USA)



LIGO Livingston (USA)

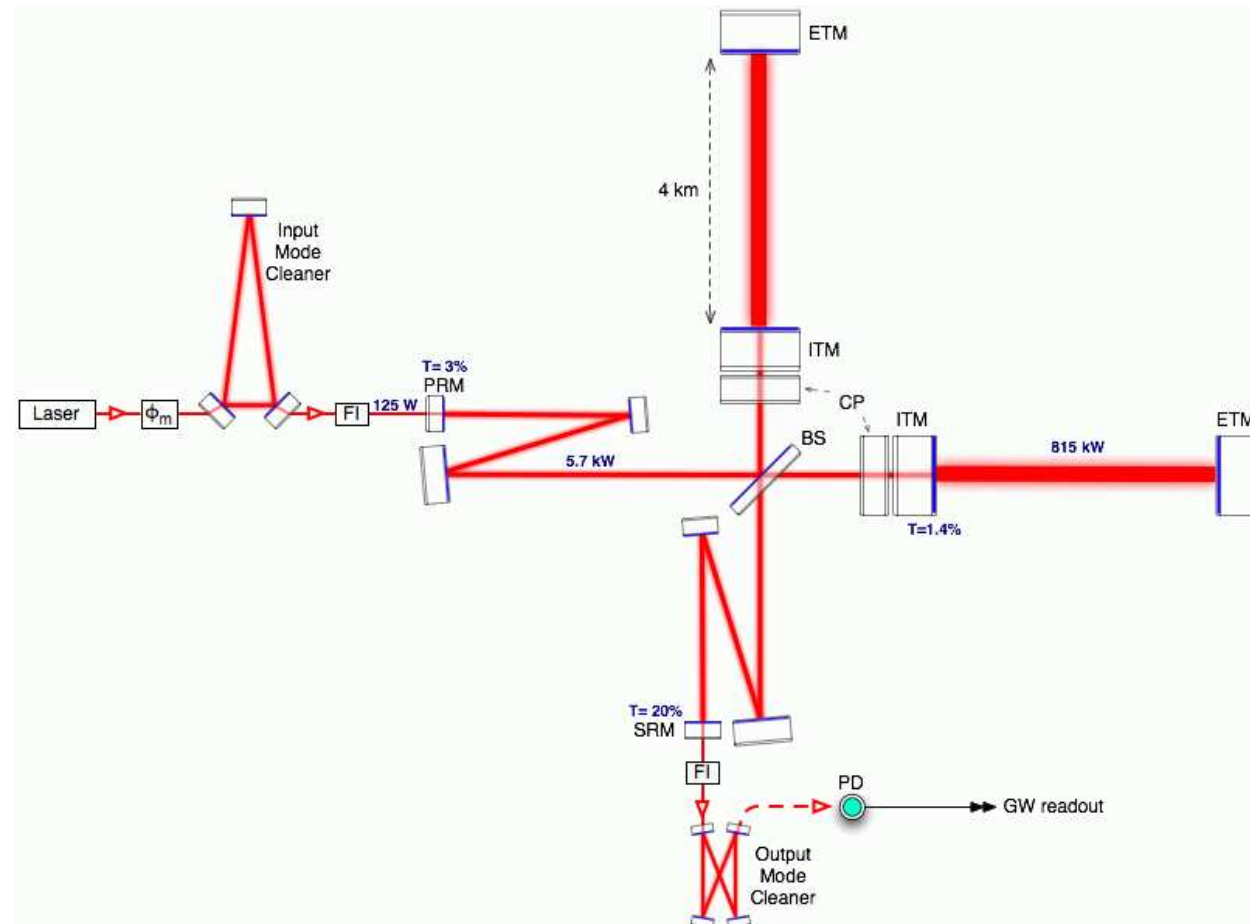


Detekcja fal grawitacyjnych

Advanced LIGO

Modernizacja detektora 2012-2015:

- 20× moc lasera
- signal recycling
⇒ prawie MW we wnętrzu!
- cięższe “masy testowe”
- nowe powłoki luster
- aktywne tłumienie sejsmiczne
- filtr na wyjściu

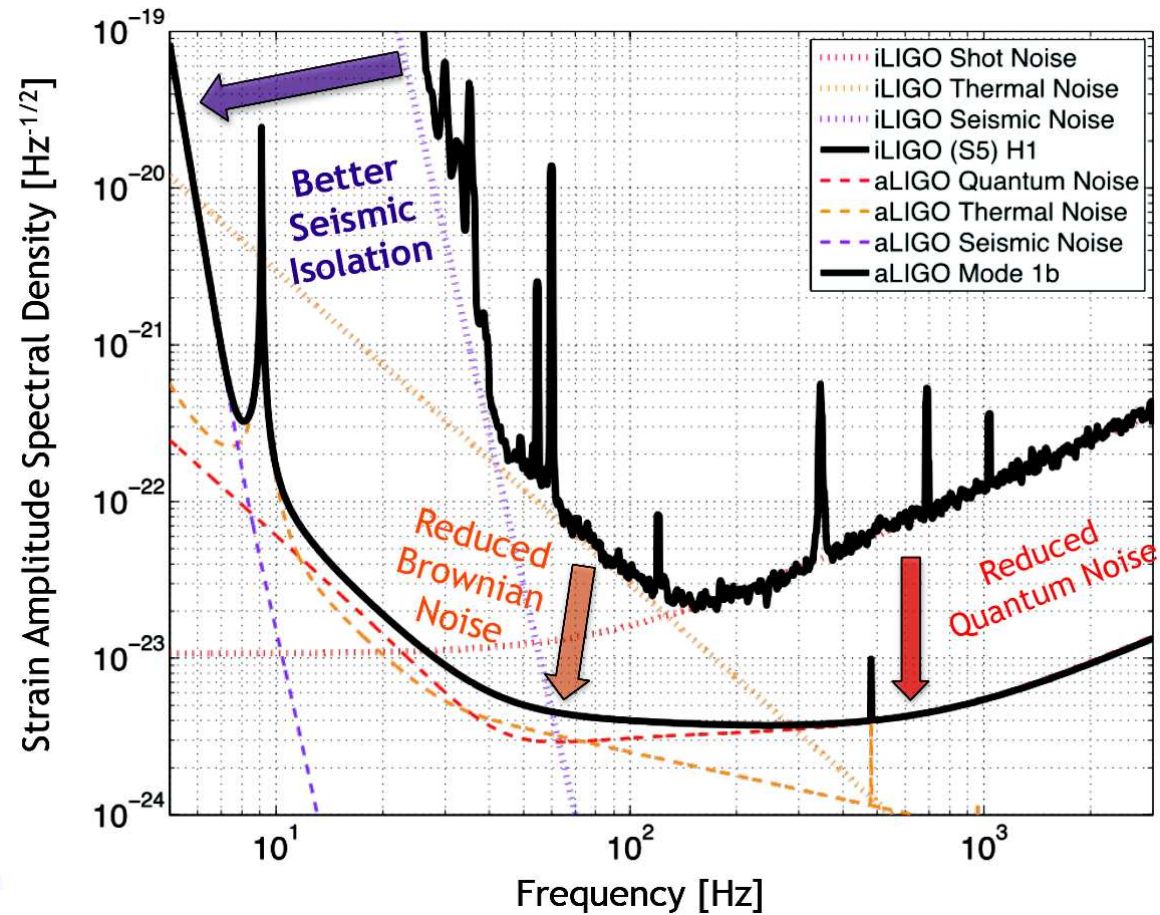


Podobne modernizacje w Virgo

Detekcja fal grawitacyjnych

Advanced LIGO

Zwiększenie czułości o rząd wielkości, poszerzenie zakresu częstości

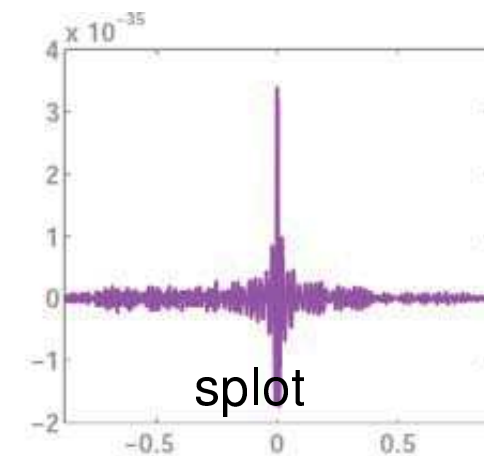
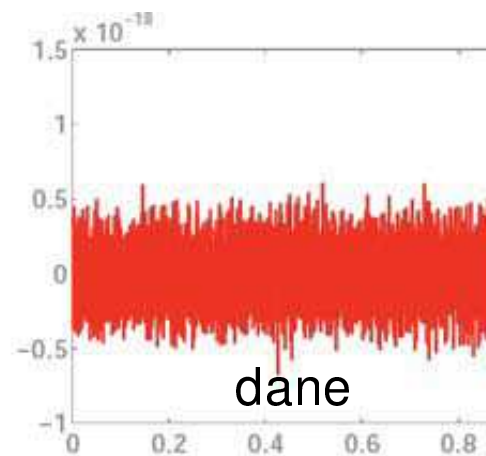
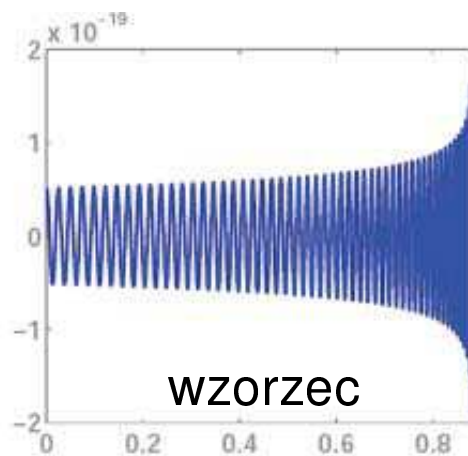
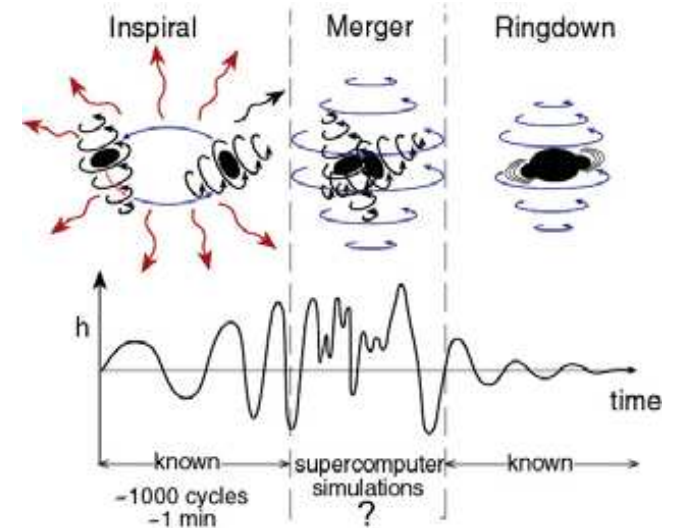


Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału CBC - Compact Binary Coalescence

Potrafiemy modelować emisję fal grawitacyjnych przy zlewaniu się układu podwójnego. Emisja jest stosunkowo długa i ma charakterystyczny przebieg.

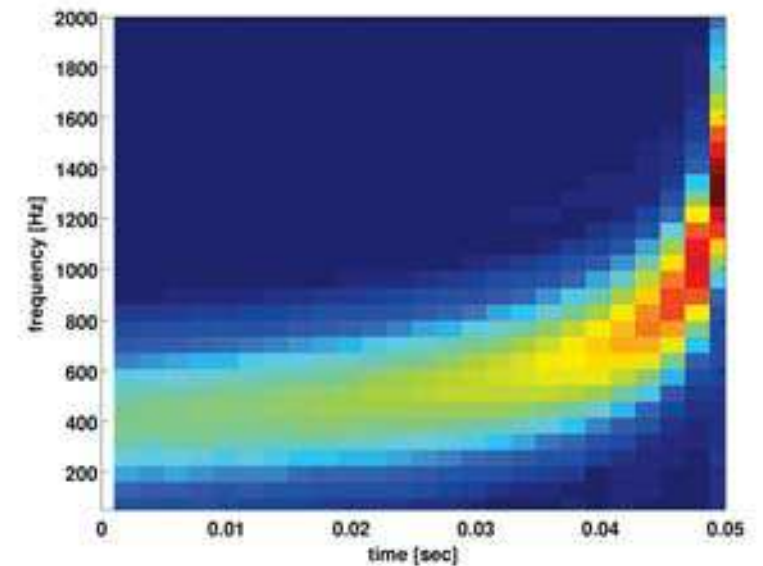
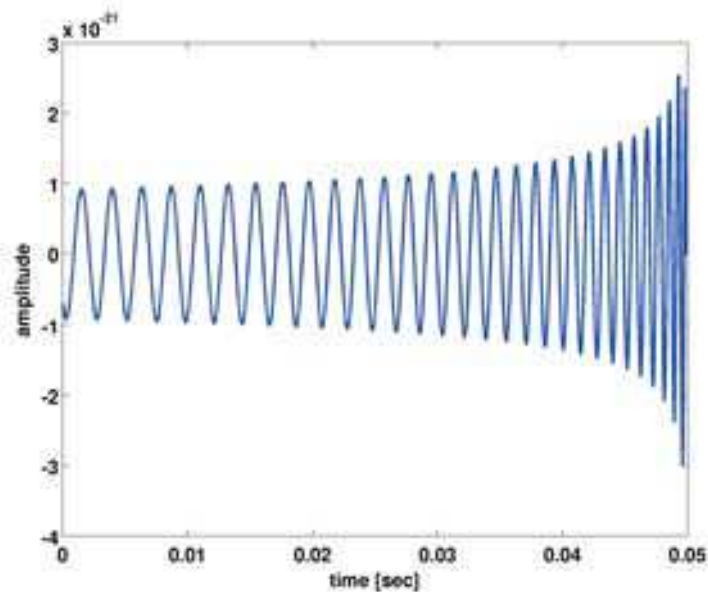
Możemy porównywać wzorzec z danymi



Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału

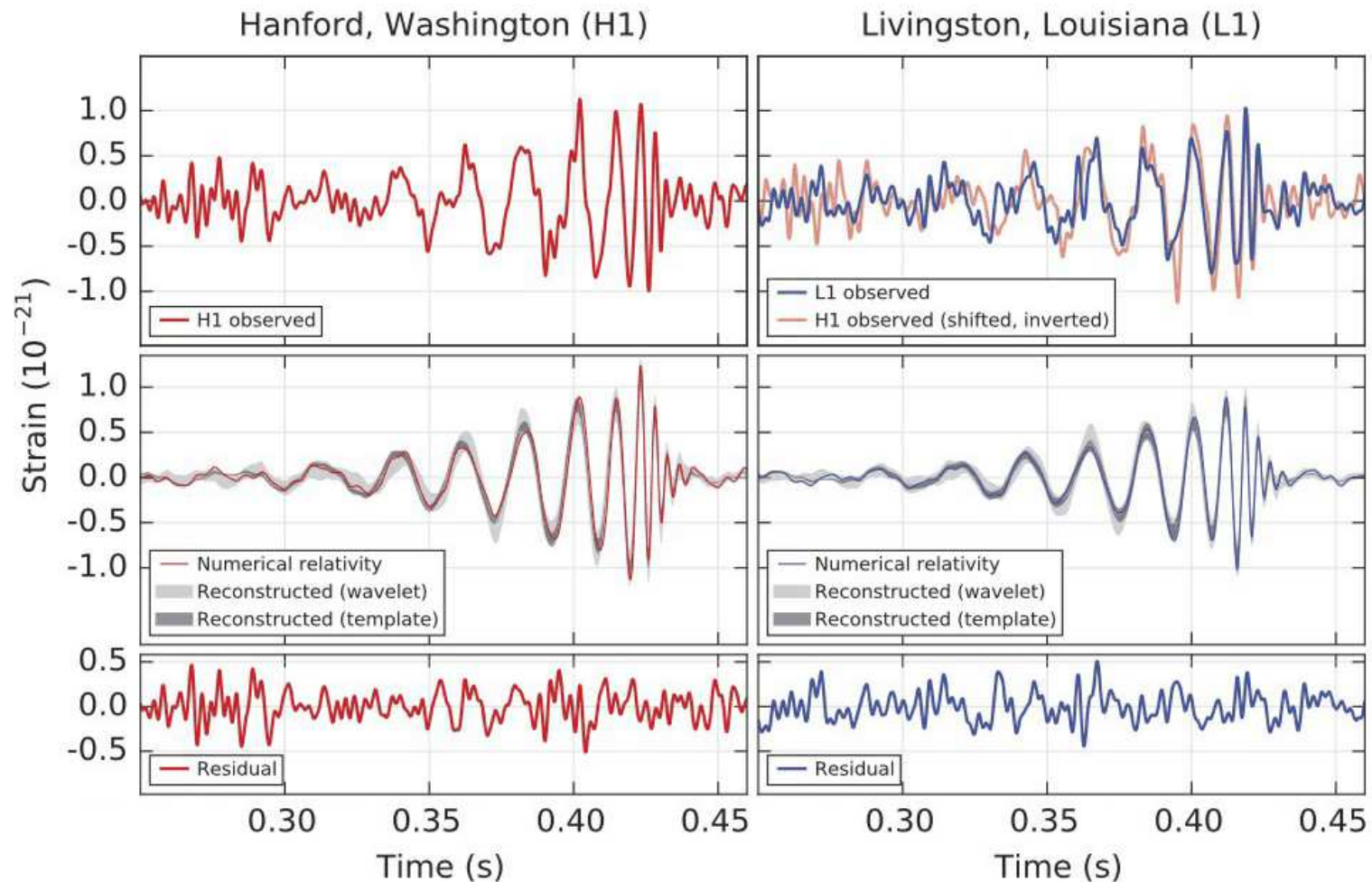
Alternatywne podejście: szukanie “rozbłysku” na mapie czas-częstość



GW150914

Odkrycie

14 września 2015 o godz. 09:50:45 UTC interferometry LIGO wykryły sygnał “wyłapanany” przez algorytmy poszukujące przypadków typu CBC



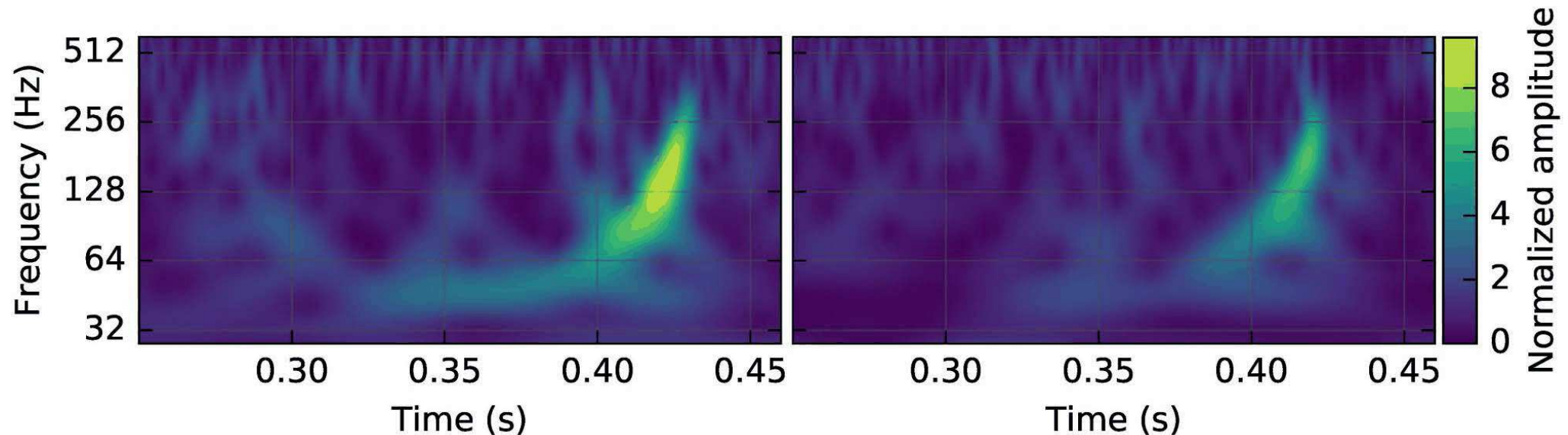
GW150914

Odkrycie

14 września 2015 o godz. 09:50:45 UTC

Sygnał był na tyle silny, że widoczny był “gołym okiem” na wykresach czas-częstość

⇒ detekcja niezależna od przyjętego modelu

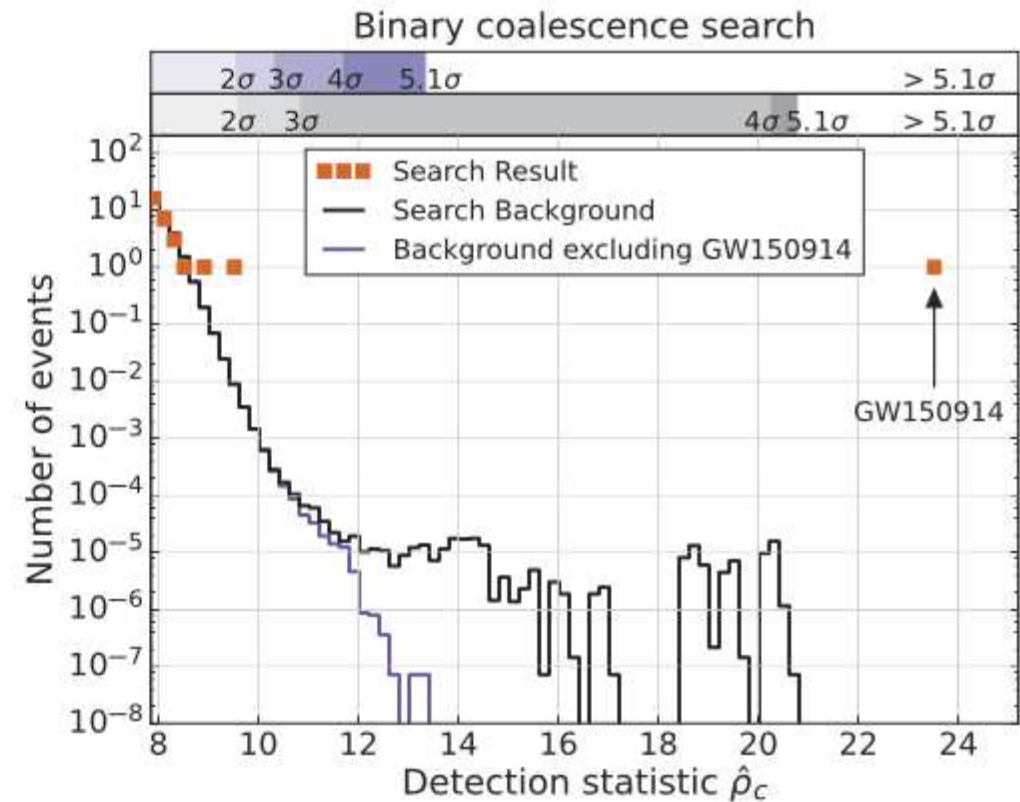
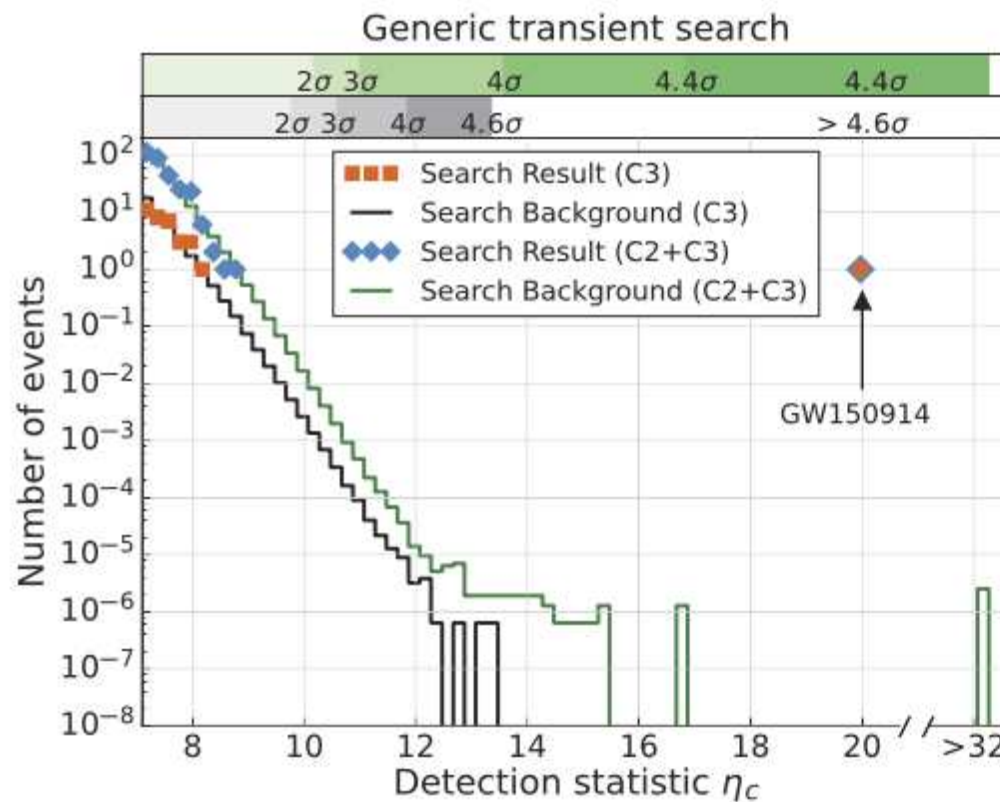


4 dni przed oficjalnym rozpoczęciem zbierania danych...

GW150914

Odkrycie

Ocena tła



Poszukiwanie niezależne od modelu: znaczoność na poziomie $> 4.6\sigma$

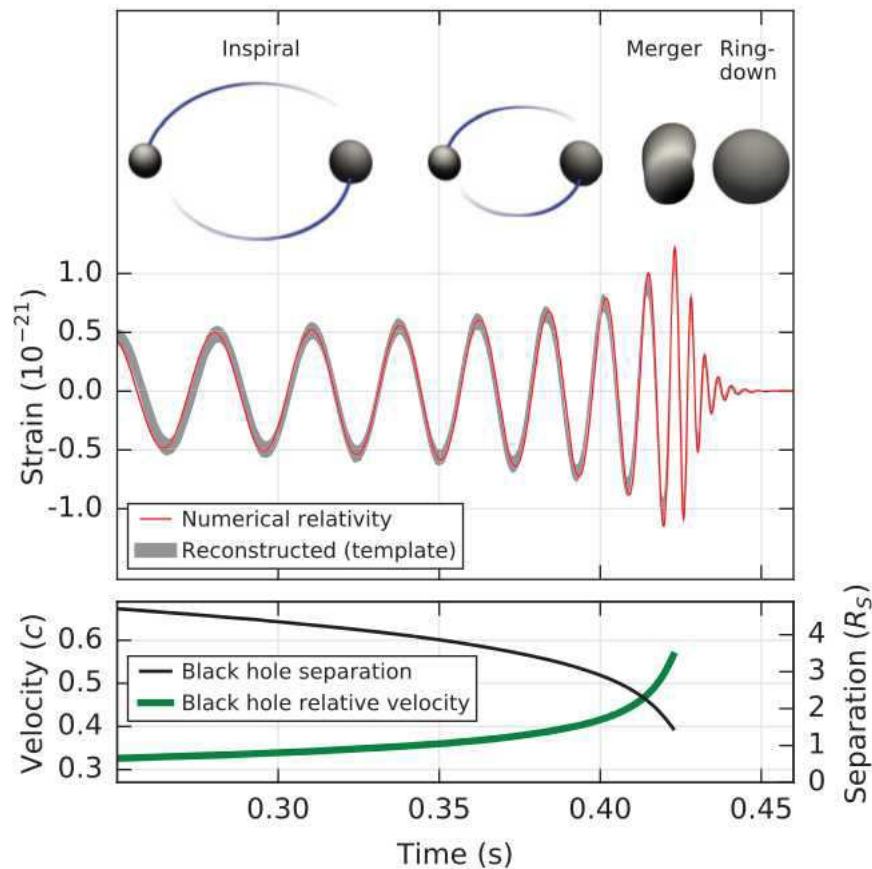
Poszukiwanie przypadków typu CBC: znaczoność na poziomie $> 5.1\sigma$

⇒ oczekiwane tło poniżej 1 przypadku na 203 000 lat

GW150914

Dopasowanie

Dopasowane parametry modelu zlewających się 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:

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

$$z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$$

GW150914

Nobel 2017

3 October 2017

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to

Rainer Weiss, LIGO/VIRGO Collaboration

and the other half jointly to

Barry C. Barish, LIGO/VIRGO Collaboration

and

Kip S. Thorne, LIGO/VIRGO Collaboration

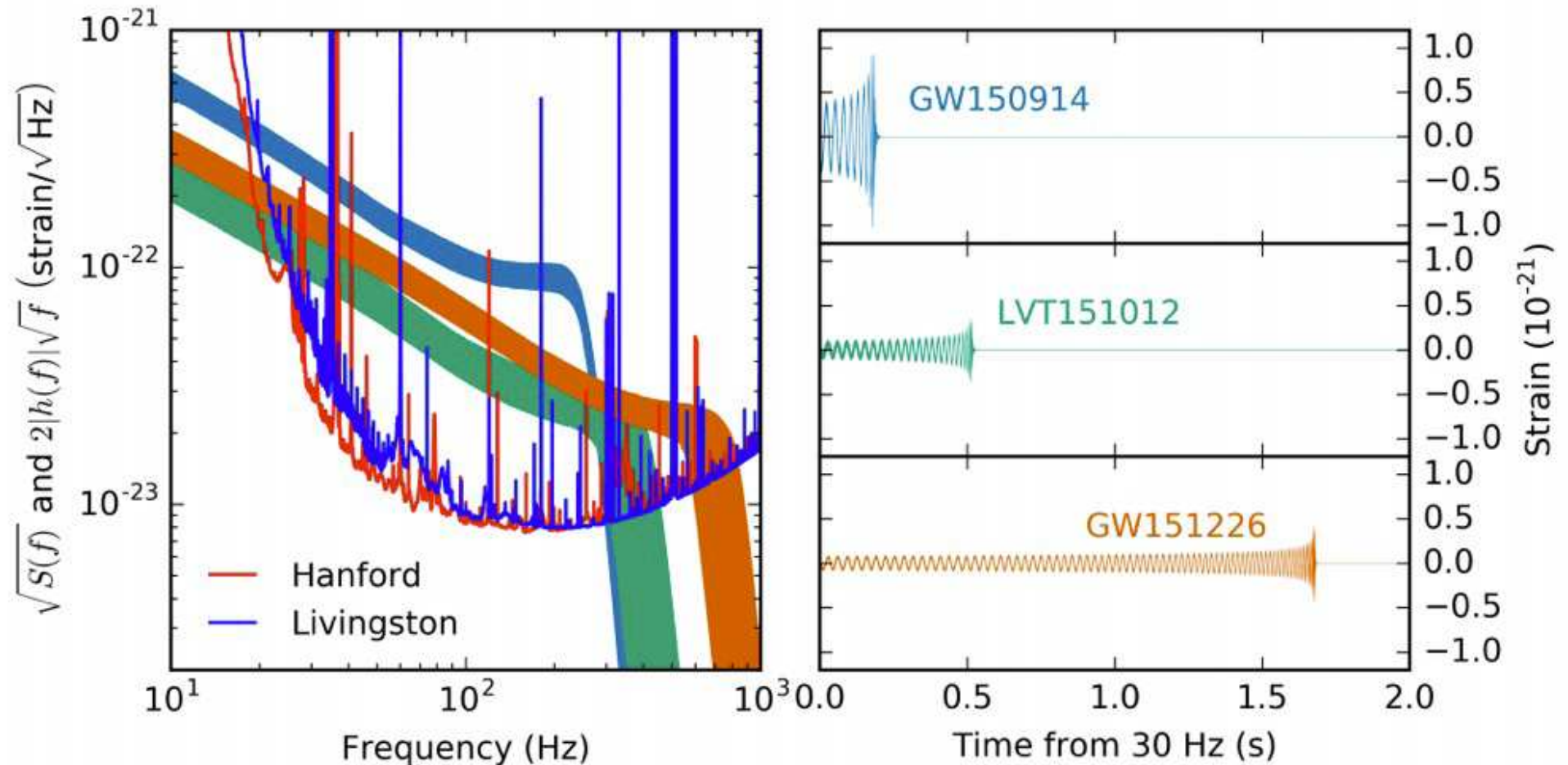
“for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”



Kolejne detekcje

Wyniki LIGO 2015

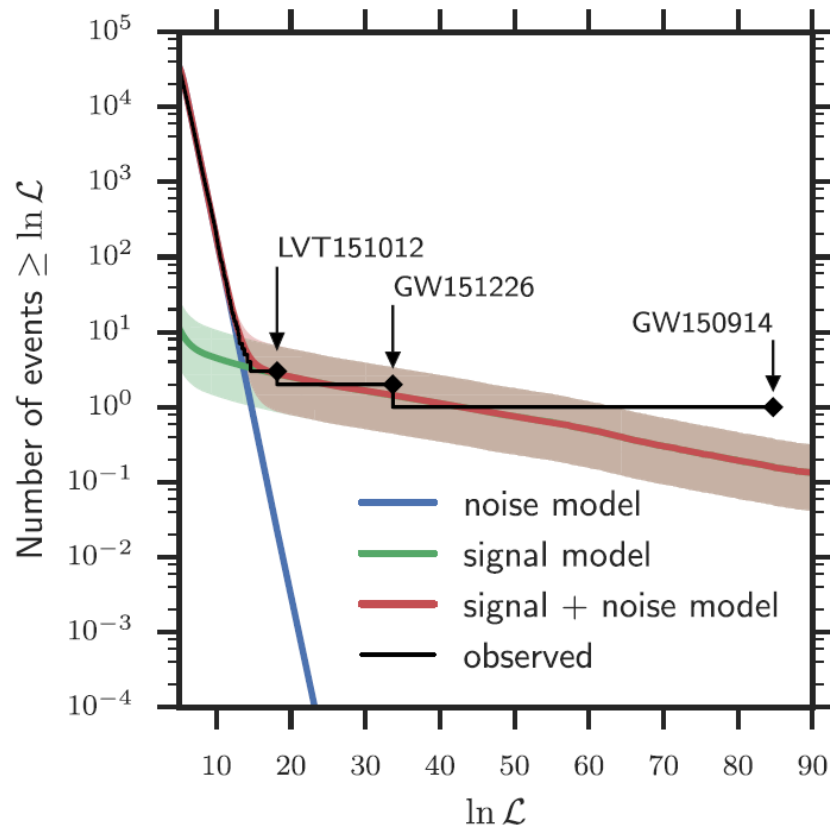
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w roku 2015: jeden “pewny” (GW151226) i jeden “kandydat” (LVT151012 \Rightarrow GW151012)



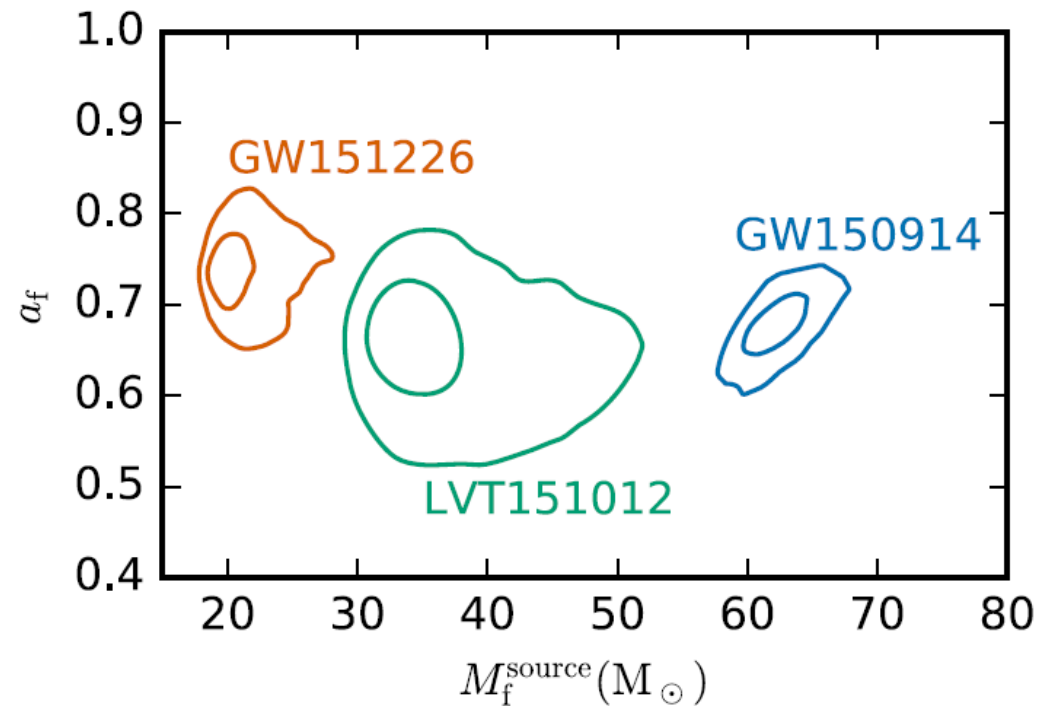
Kolejne detekcje

Wyniki LIGO 2015

Oczekiwane tło



Masa i spin końcowej czarnej dziury



Run O1 trwał 4 miesiące (12 września 2015 do 19 stycznia 2016) \Rightarrow 3 przypadki

Kolejne detekcje

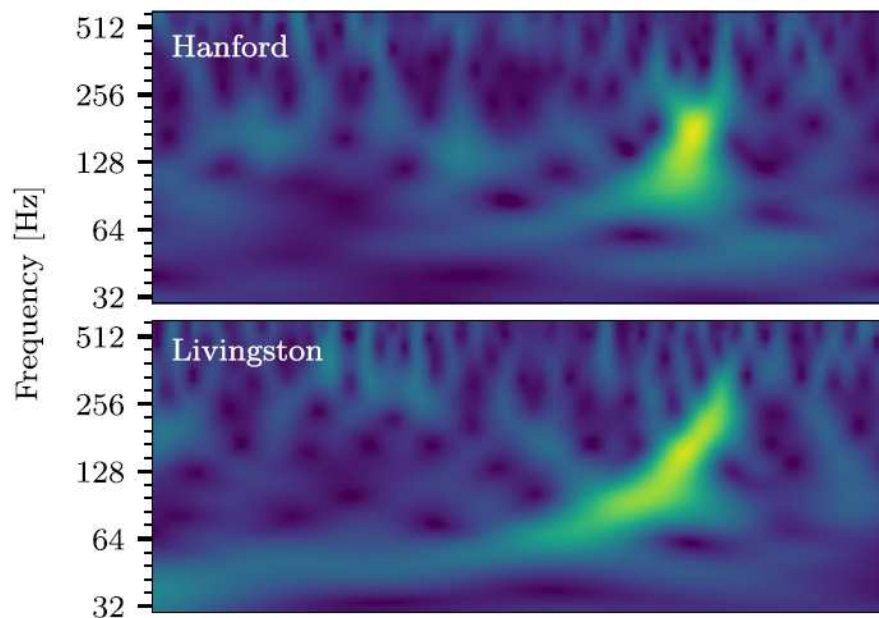
Run O2

W roku 2016 wprowadzono dalsze usprawnienia w detektorze.

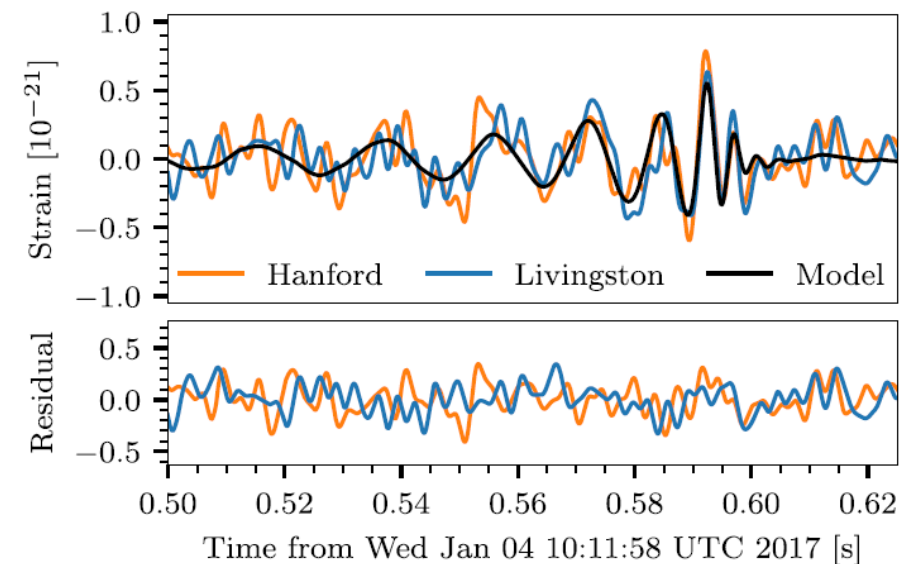
Run O2 rozpoczął się 30 listopada 2016 i trwał do 25 sierpnia 2017 (9 miesięcy)

Pierwszy przypadek zaobserwowany 4 stycznia 2017 (upubliczniony 1 czerwca 2017)

Widmo częstości



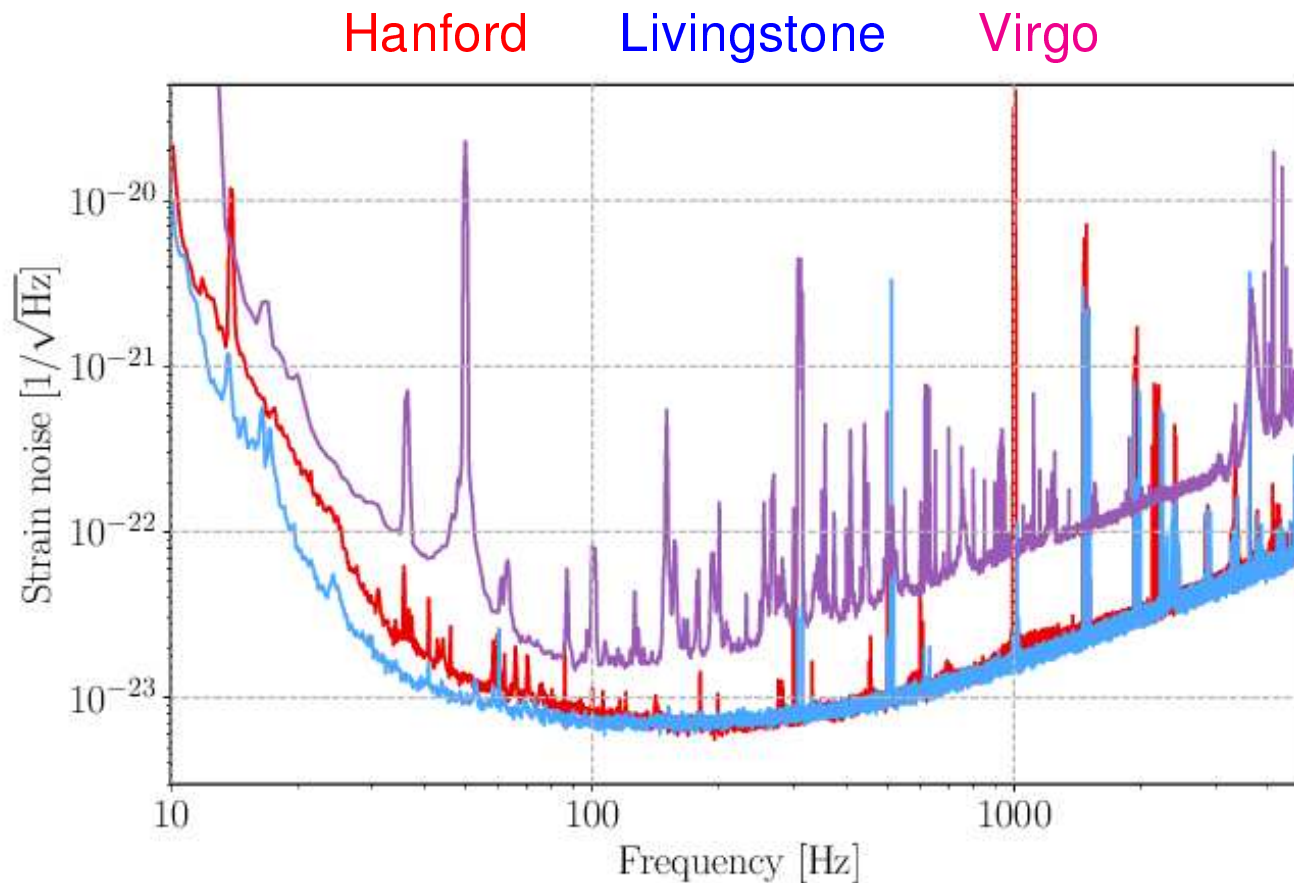
Dopasowanie wzorca



Kolejne detekcje

Run O2

Od 1 sierpnia 2017 do pomiarów włączyło się Virgo (choć z gorszą czułością)



Kolejne detekcje

Algorytmy

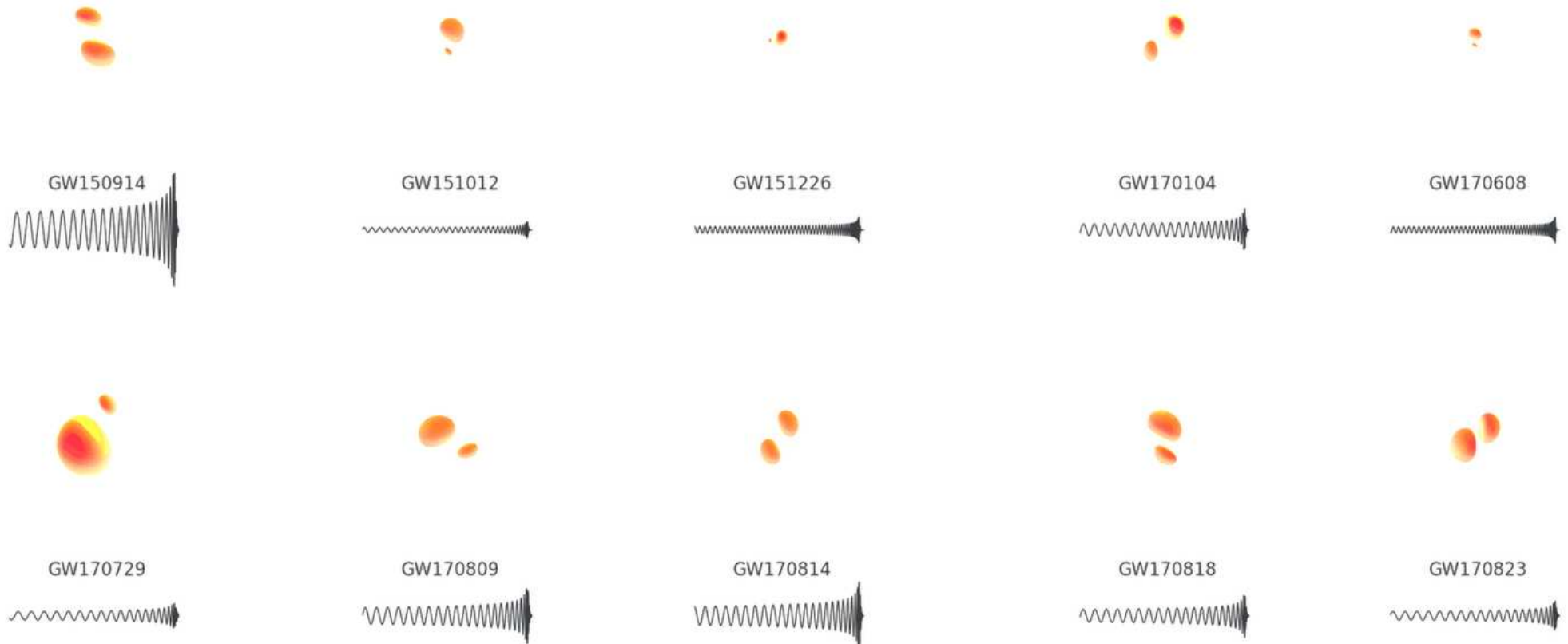
W run O2 wykorzystywano 3 różne algorytmy wyszukiwania przypadków:

- PyCBC
Porównywanie danych z bankiem wzorców. Próg wyzwalania: $S/N=5.5$
Dwa detektory muszą “dopasować” do tego samego wzorca z dokładnością 15ms
- GstLAL
Niezależny algorytm wyszukiwania wzorców oparty na metodzie Monte Carlo.
- cWB (coherent WaveBurst)
Niezależne od modelu poszukiwanie sygnałów.
“Błyski” mocy na rozkładzie czas-częstość dla częstości poniżej 1kHz

Kolejne detekcje

Run O2

“Worek rozsypał się” w sierpniu 2017...



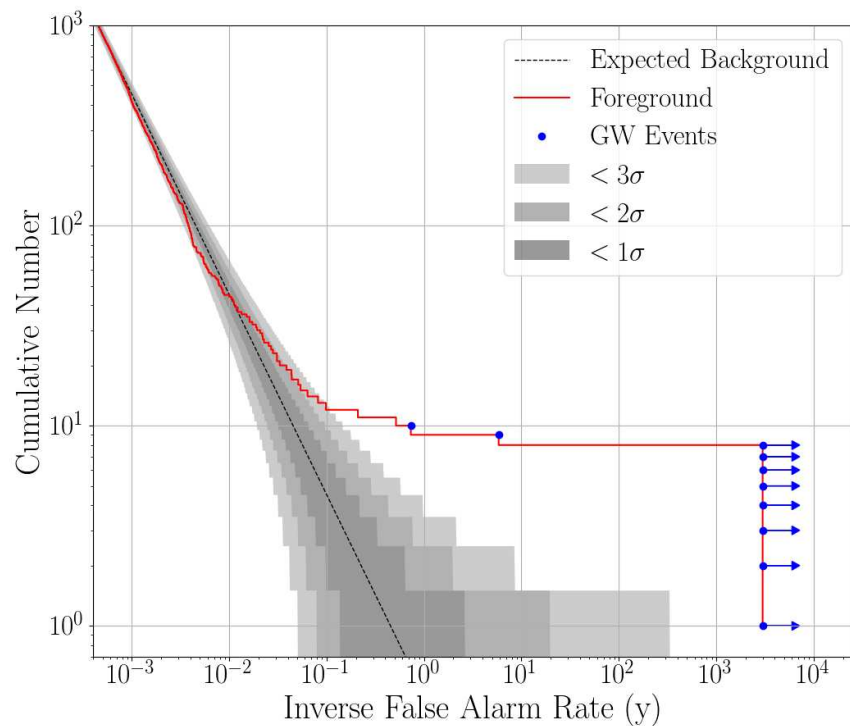
Łącznie $3+7=10$ detekcji zderzeń czarnych dziur w ciągu $4+9$ miesięcy...

Kolejne detekcje

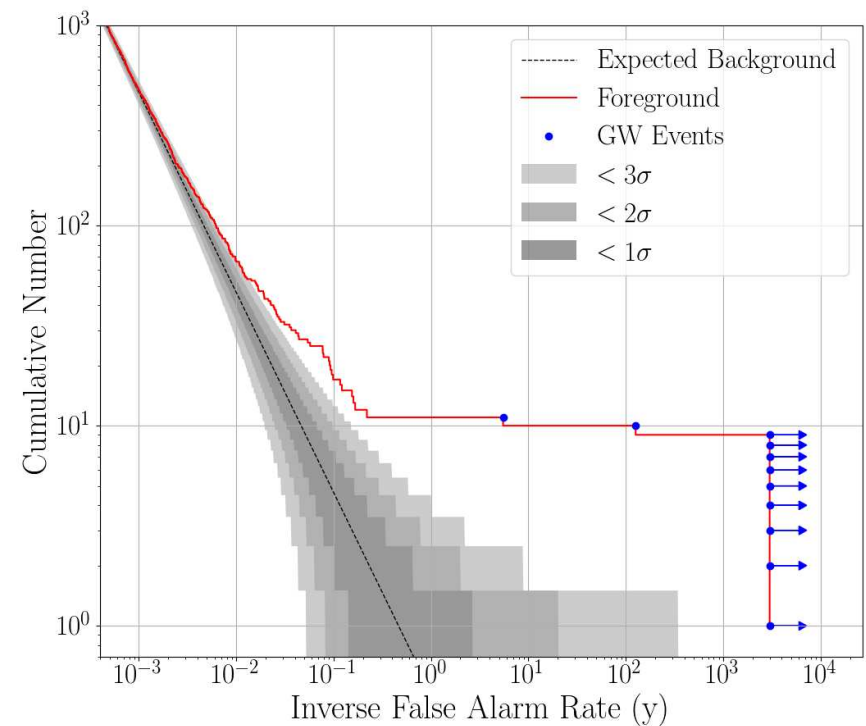
Run O2

Akceptowane przypadki, dla których prawdopodobieństwo fluktuacji odpowiadało częstości fałszywych detekcji mniejszej niż 1 na 30 dni.

PuCBC



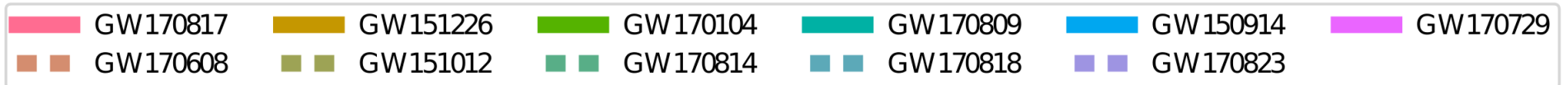
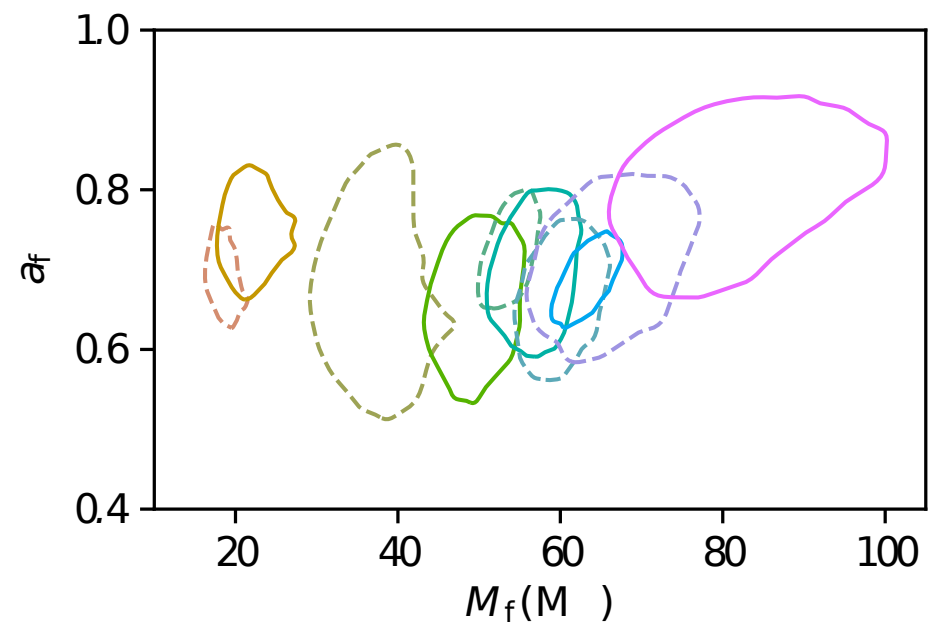
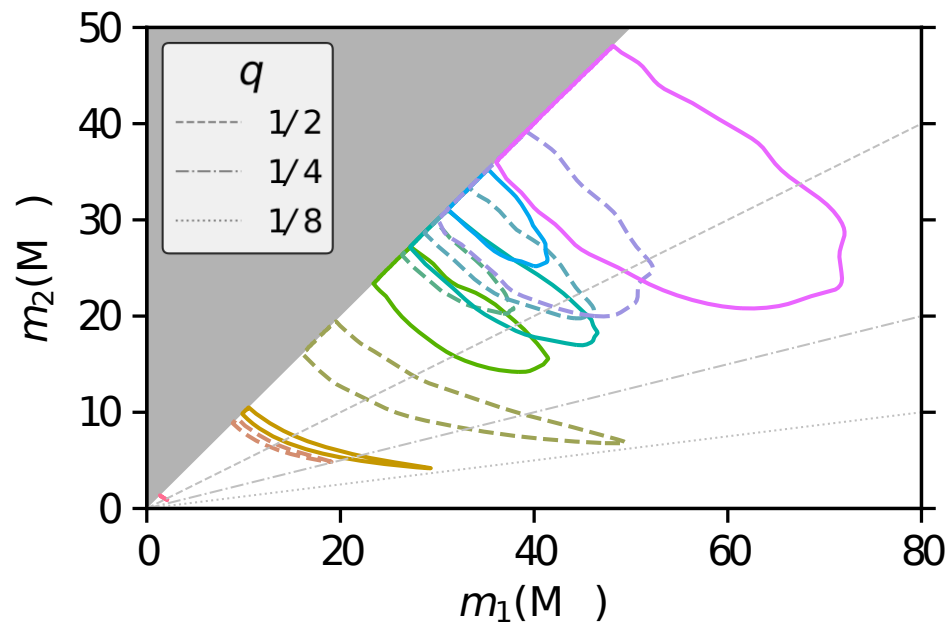
GstLAL



Kolejne detekcje

Widmo mas czarnych dziur

Wyniki dopasowania wzorców do zmierzonych przypadków

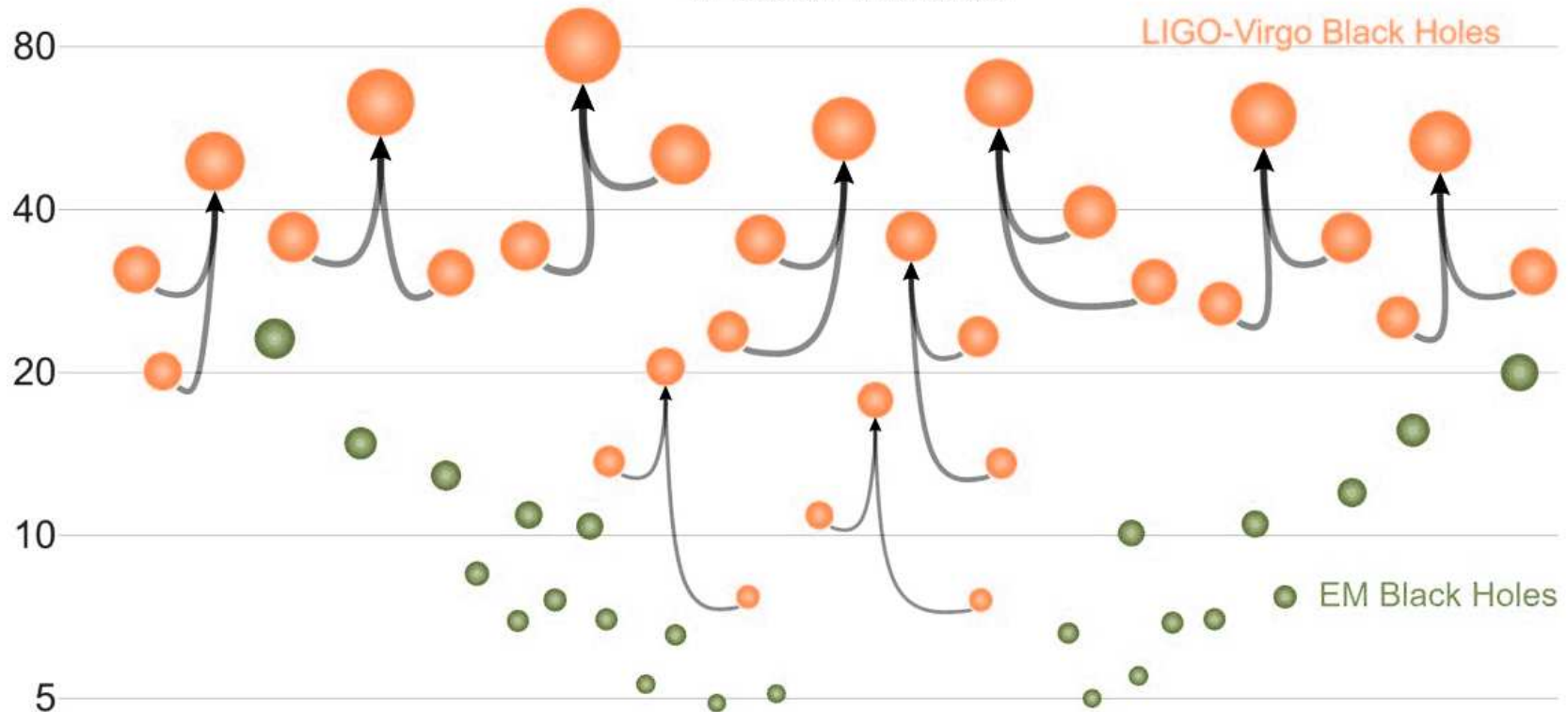


Kolejne detekcje

Widmo mas czarnych dziur

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

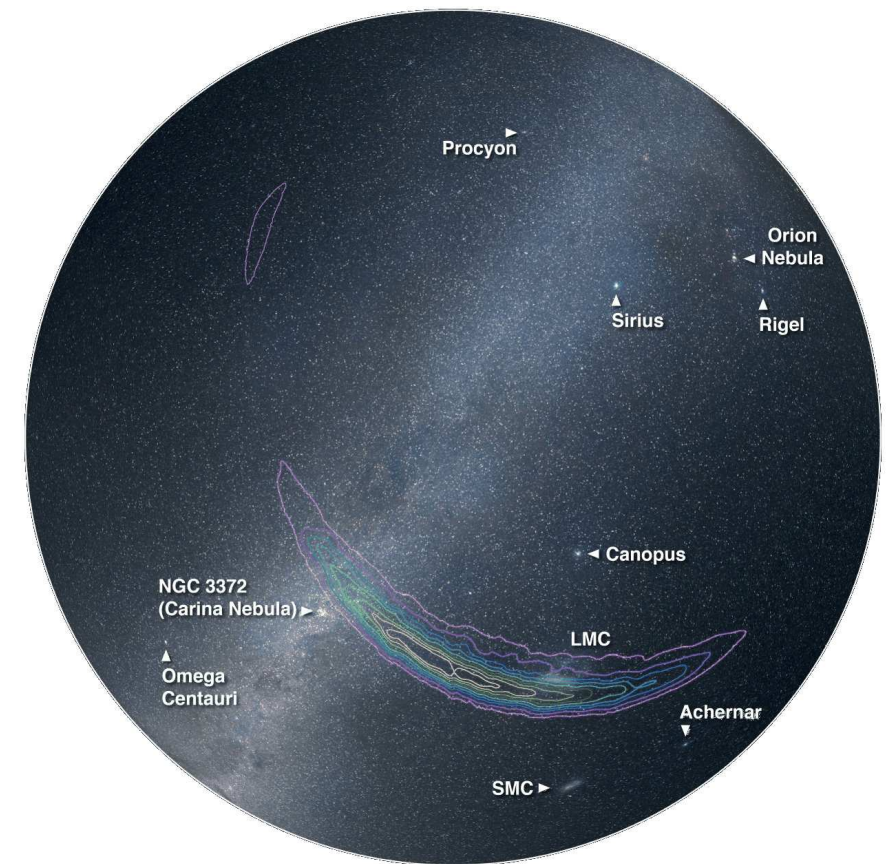
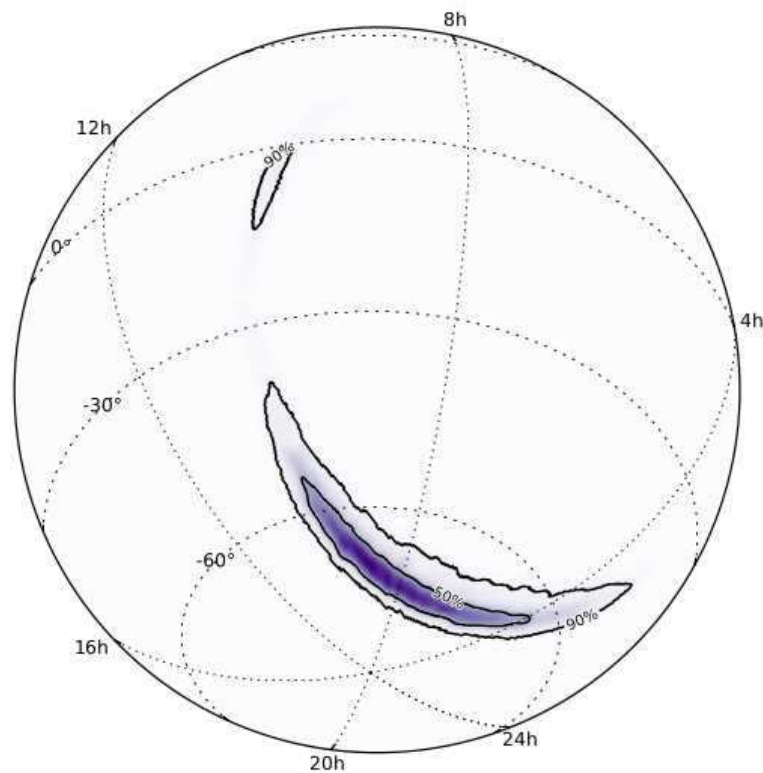
Masses in the Stellar Graveyard *in Solar Masses*



GW150914

Położenie

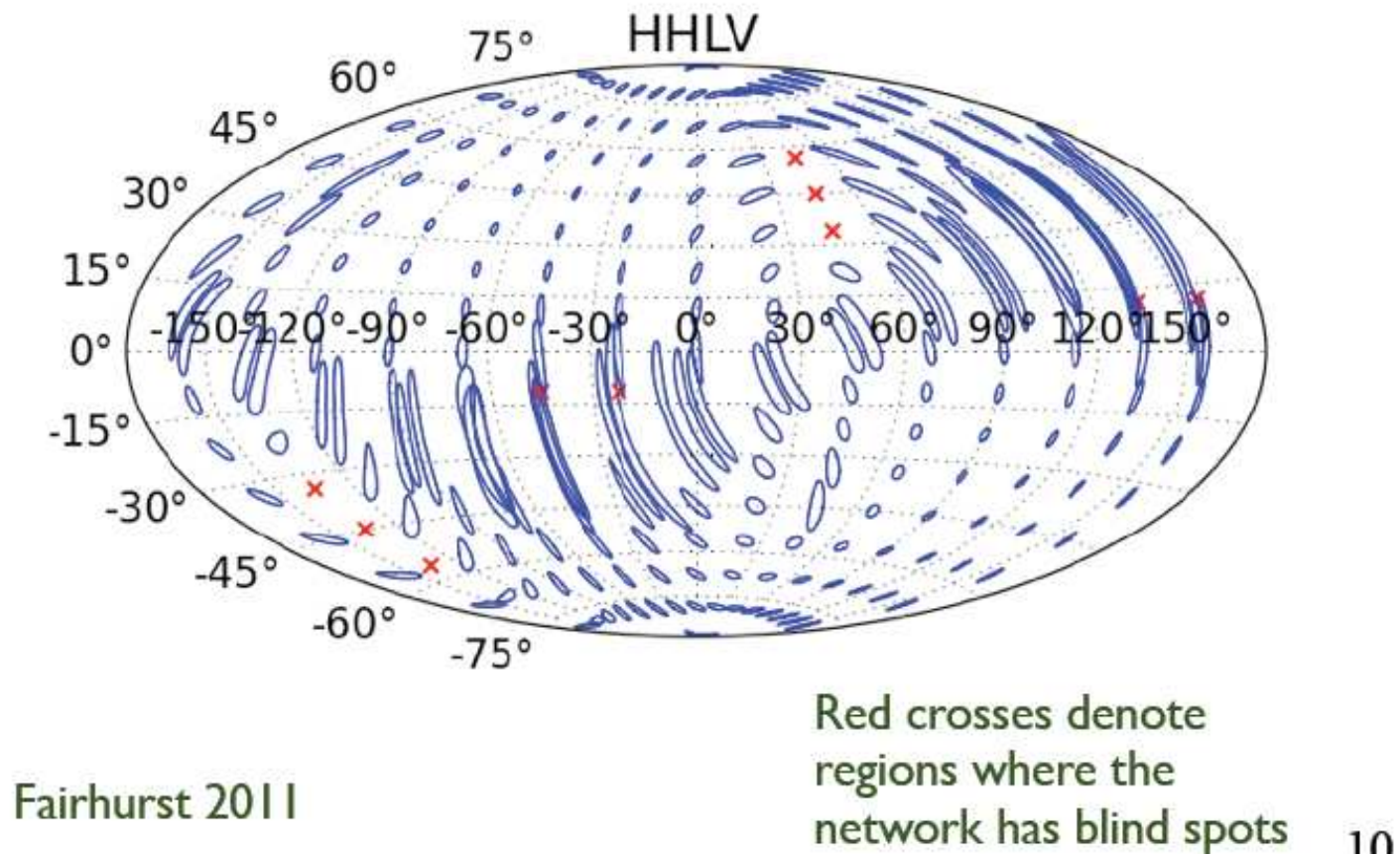
Niestety, w oparciu o pomiar w dwóch interferometrach nie jest możliwe jednoznaczne określenie pozycji. Nie zidentyfikowano potencjalnego źródła...



Detekcja fal grawitacyjnych

Położenie

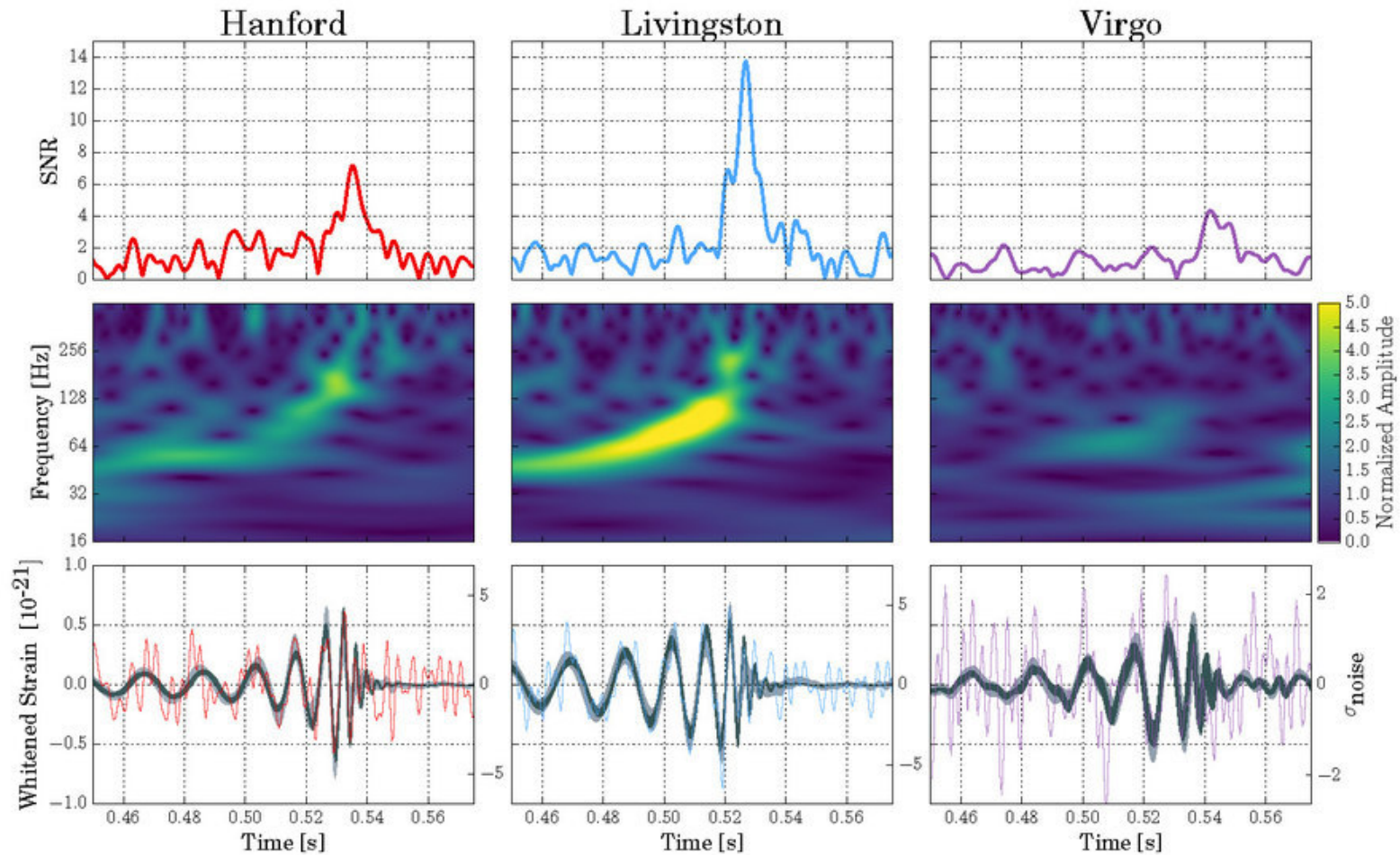
Znacznie dokładniejsze wyznaczanie pozycji stało się dopiero możliwe po uruchomieniu detektora VIRGO w sierpniu 2017 (rok opóźnienia przez problemy techniczne)



GW170814

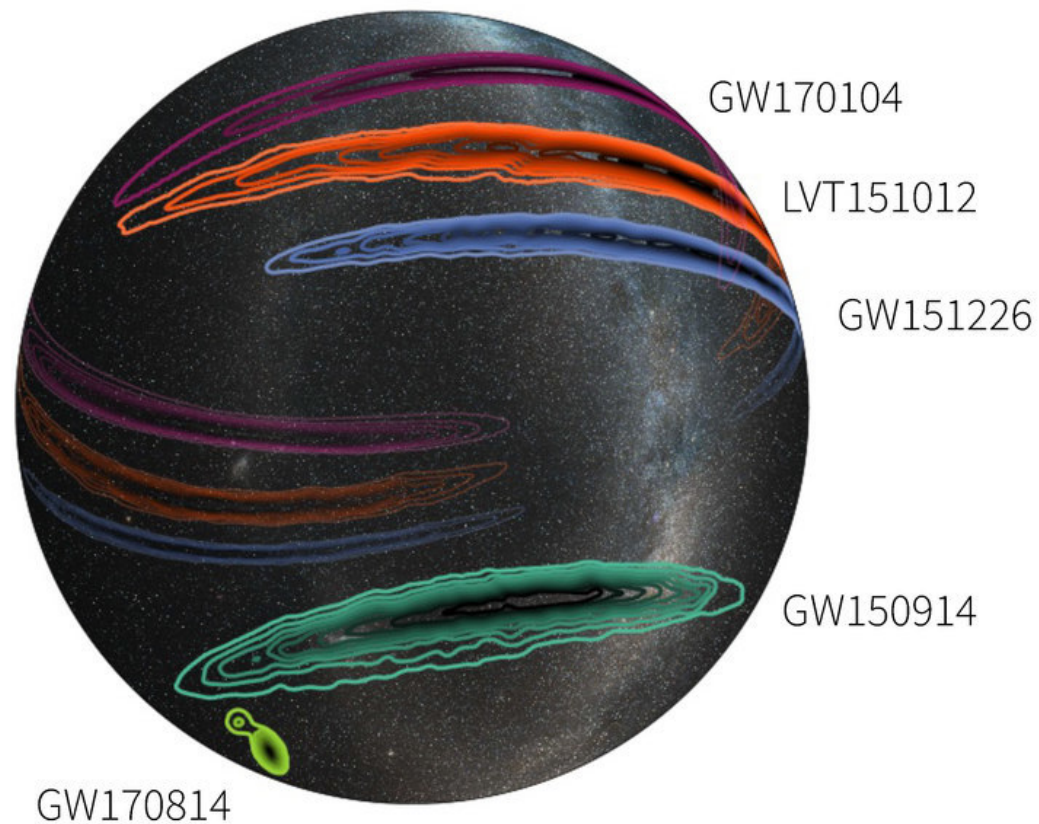
Potrójna detekcja

VIRGO włączyło się w zbieranie danych 1 sierpnia 2017



GW170814

Dużo lepsza lokalizacja

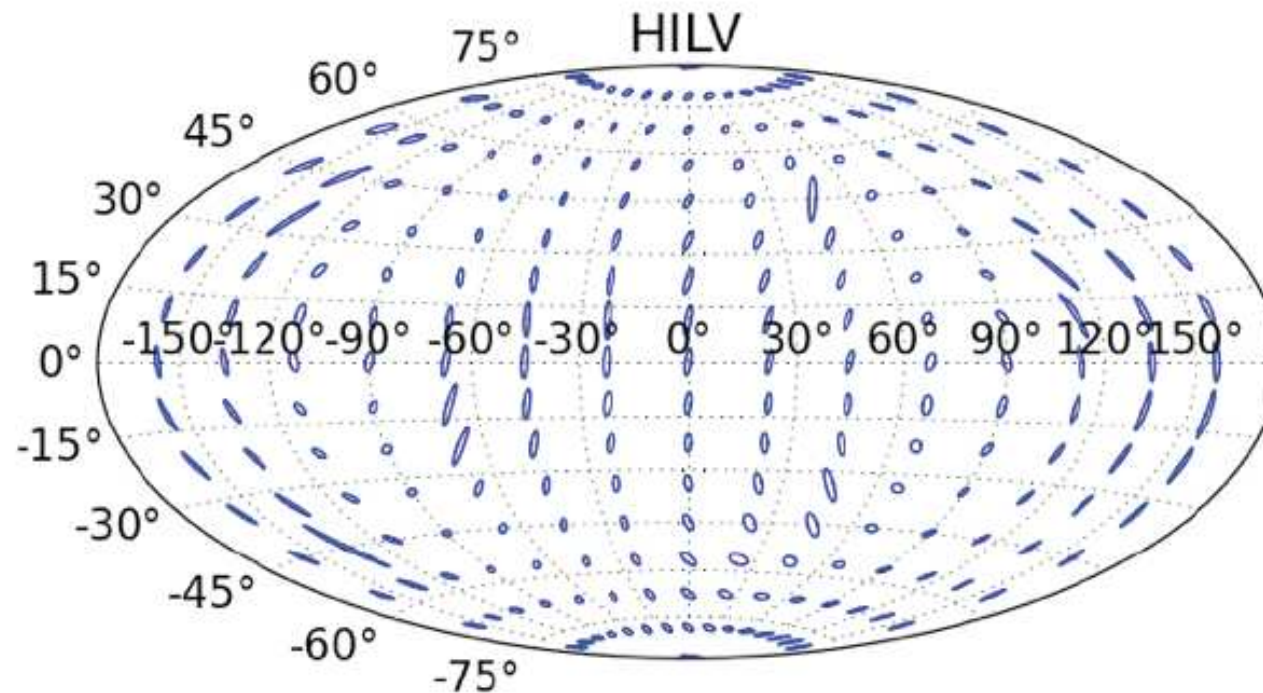


Lokalizacja kluczowa, żeby móc poszukiwać innych sygnałów...

Detekcja fal grawitacyjnych

Położenie

Znacznie dokładniejsze wyznaczanie pozycji będzie możliwe po uruchomieniu czwartego detektora **W lutym 2016 zatwierdzono budowę LIGO-India**



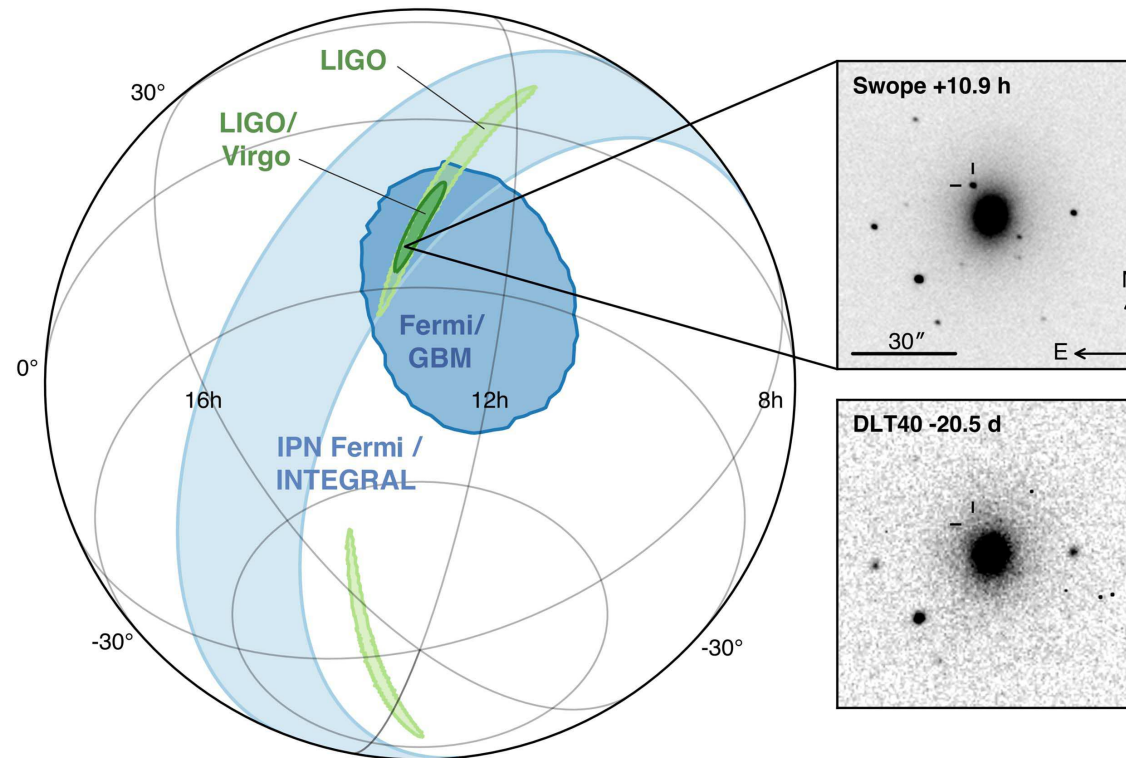
Fairhurst 2011

⇒ astronomia fal grawitacyjnych

GW170817

Wyjątkowy przypadek

LIGO i Virgo działały razem tylko przez miesiąc. Udało się zaobserwować aż 4 zderzenia czarnych dziur. I jeszcze jeden szczególny impuls fal grawitacyjnych. Zobaczyły go także inne eksperymenty !...

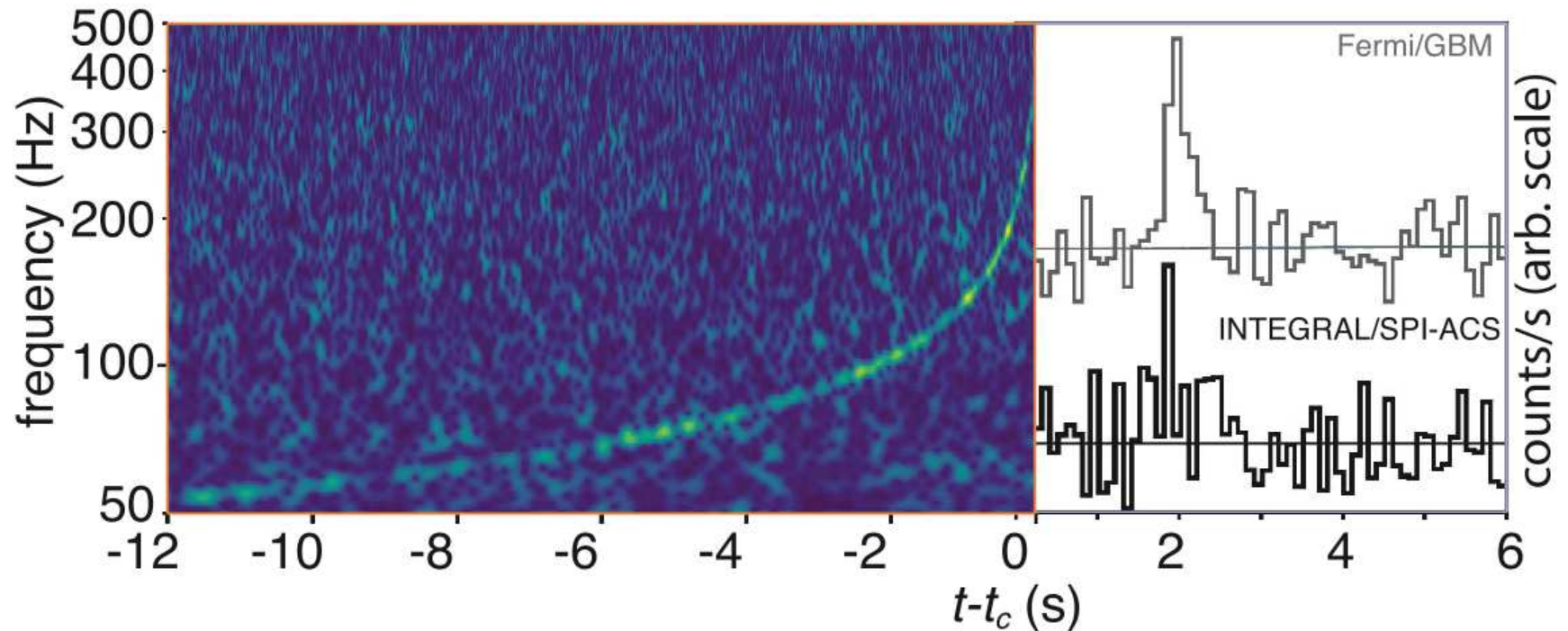


W lokalizacji zgodnej z pozycją źródła zaobserwowano wybuch supernowej!

GW170817

Identyfikacja źródła

Kształt impulsu zgodny był z hipotezą [zderzenia dwóch gwiazd neutronowych](#).
Jednocześnie satelity FERMI i INTEGRAL zaobserwowały błysk gamma...

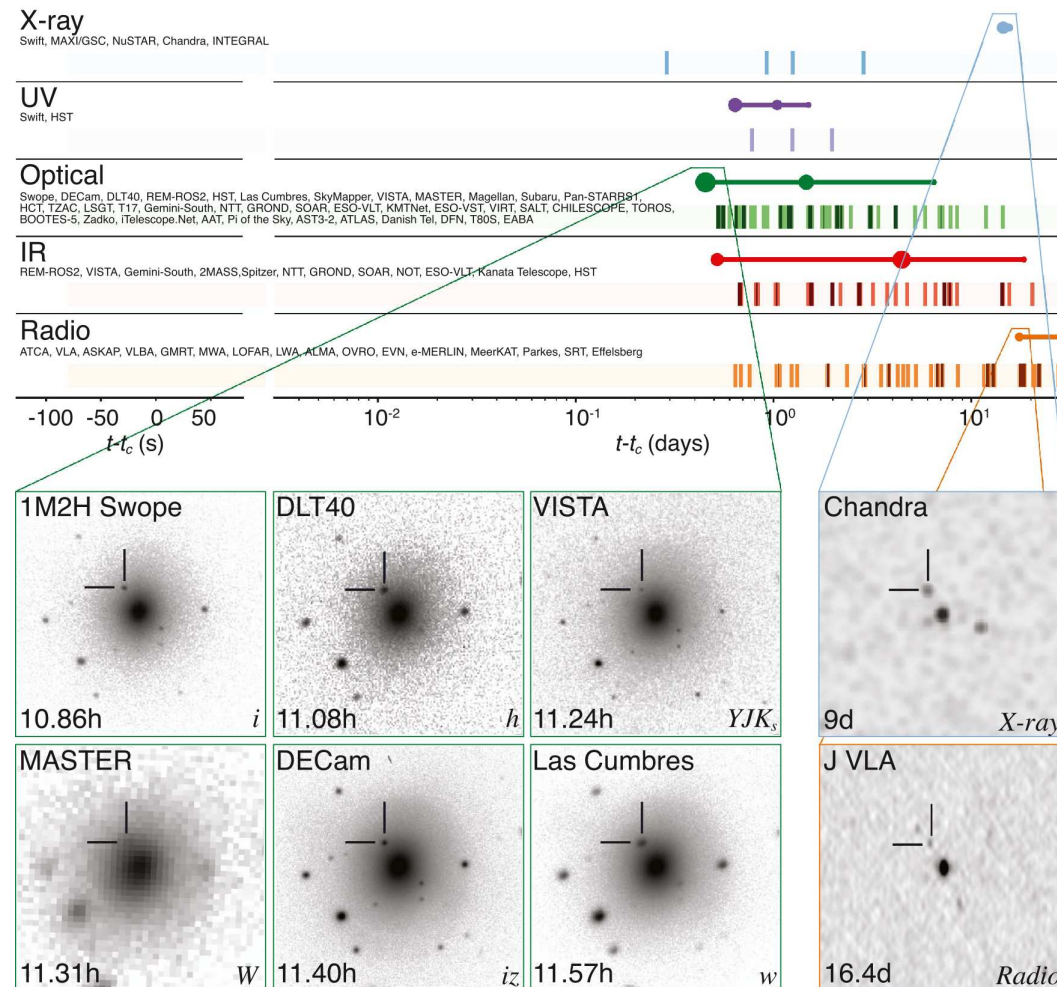


Potwierdzenie hipotezy dotyczącej pochodzenia krótkich błysków gamma

GW170817

Dalsze obserwacje

Po kilkunastu godzinach (musiała nastać noc) sygnał optyczny (także IR i UV)

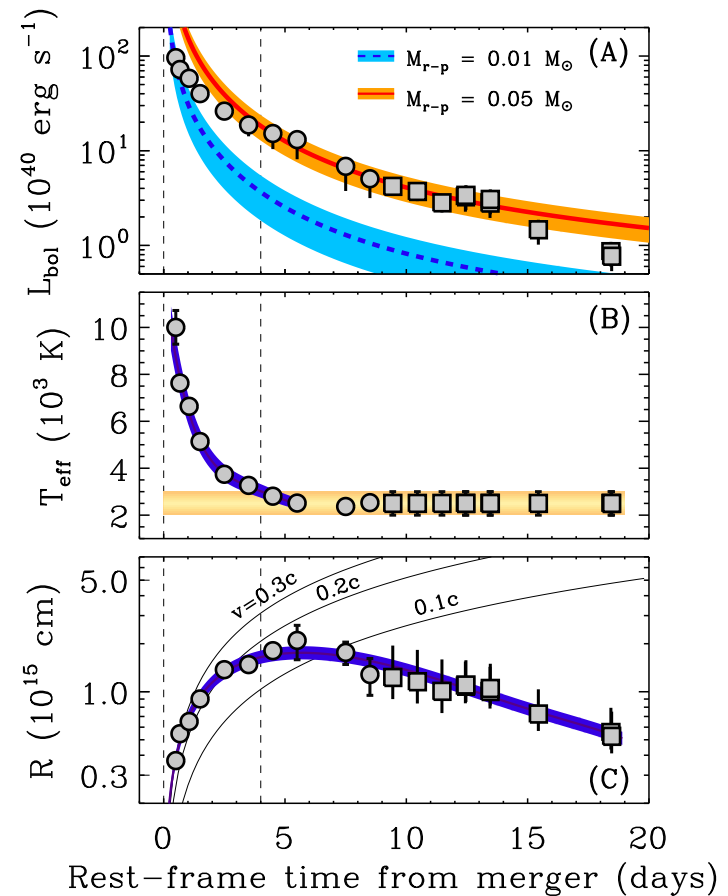
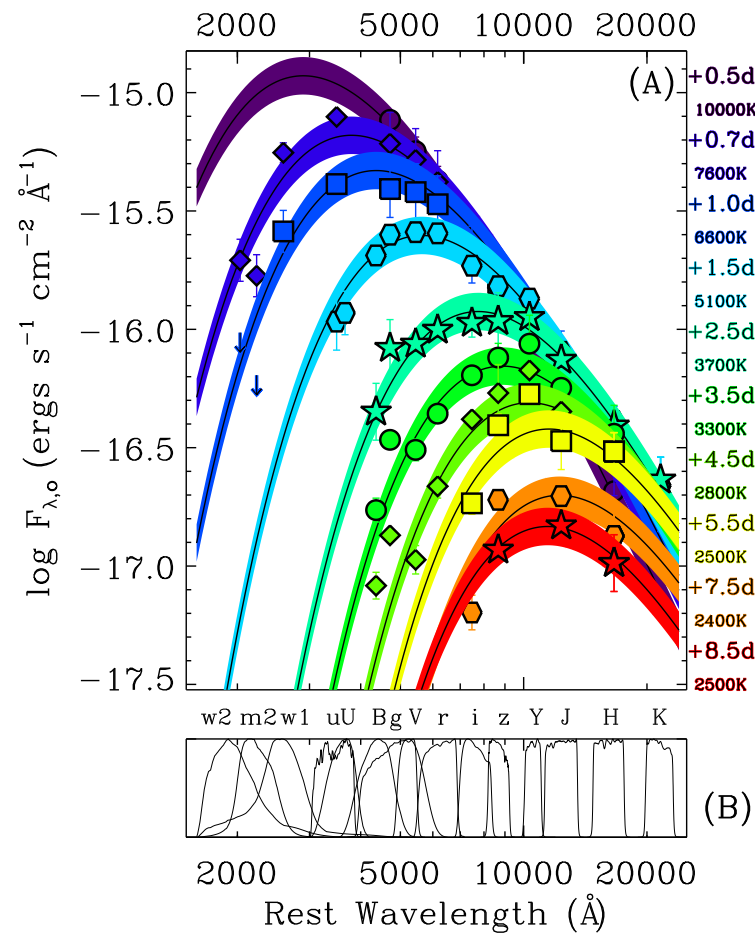


później także sygnał w prom. rentgenowskim i radiowy...

GW170817

Widmo optyczne

Widmo termiczne. Ale obserwowana ewolucja czasowa wskazuje na znaczący wkład od procesu r produkcji ciężkich nuklidów, w którym przemieniane jest do 5% masy układu!



GW170817

Wyniki

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 SSS17a (tzw. “kilonowej”) obserwowany w galaktyce NGC4993 miał miejsce ok. **100 milionów lat temu...**

Zasadniczy wybuch trwał ok. 60 sekund, ale dalsza ewolucja układu i oddziaływanie wyrzuconej materii z materią międzygwiazdą dawały mierzalne sygnały w szerokim zakresie widma EM jeszcze przez wiele tygodni...

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

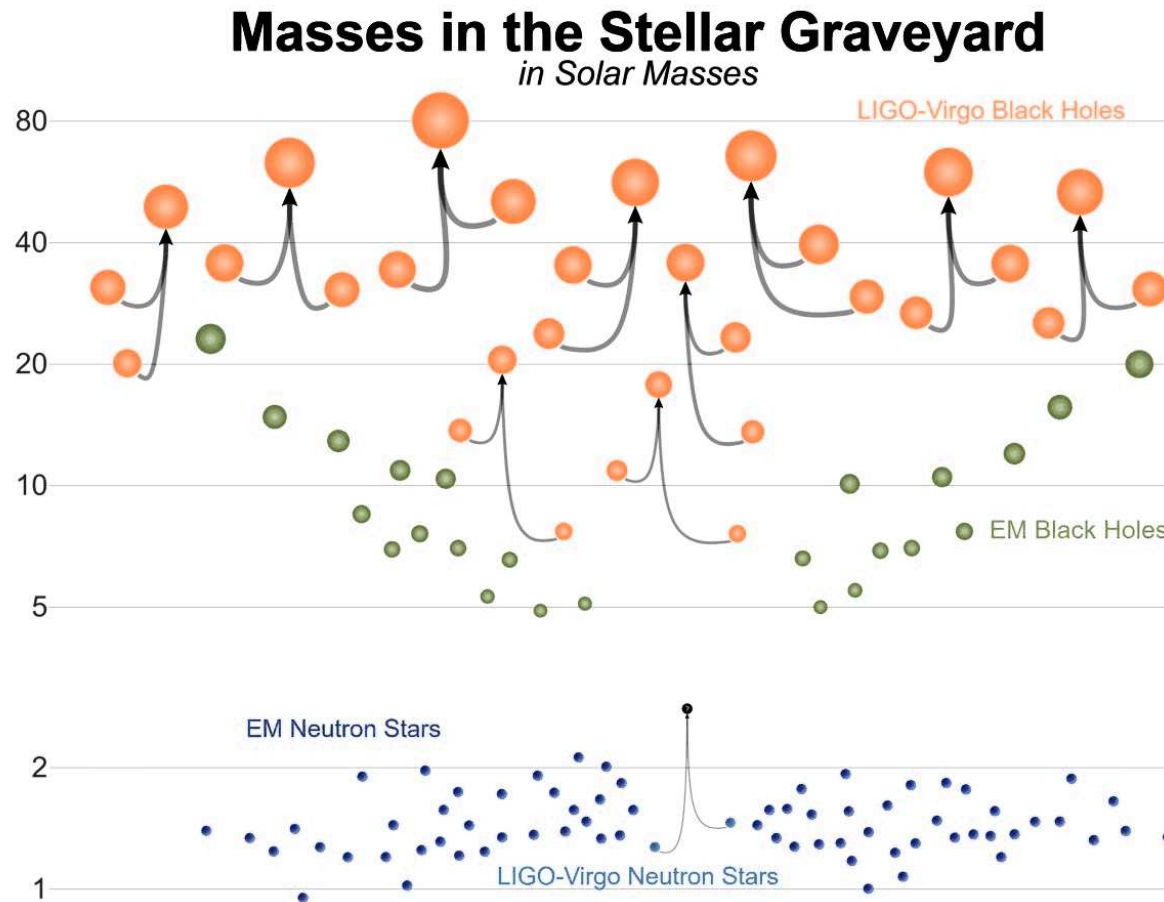
W ilości wystarczającej do wytłumaczenia ich zawartości we Wszechświecie...

Potwierdziliśmy też przewidywania Ogólnej Teorii Względności:

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

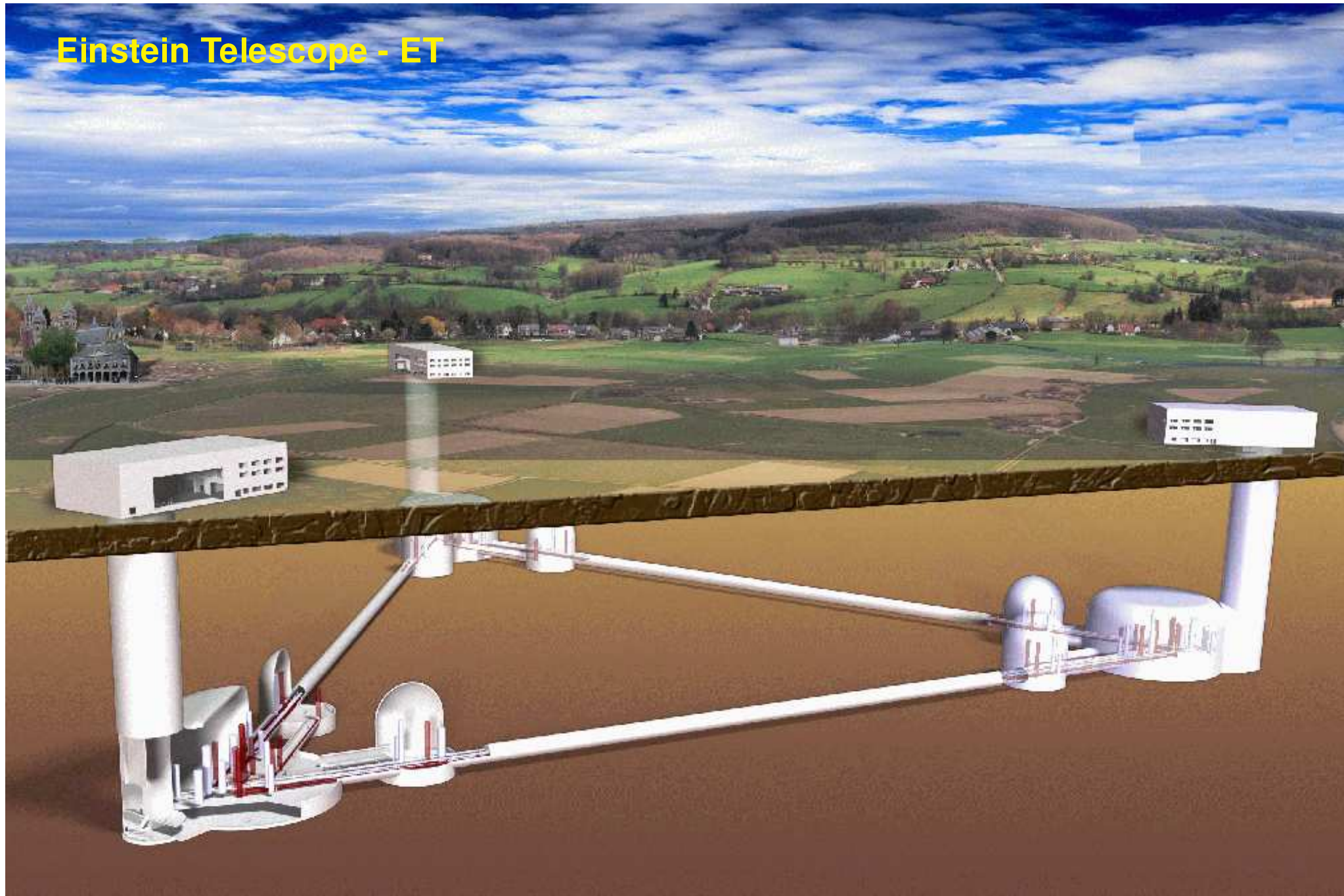
Detekcja fal grawitacyjnych

Widmo mas źródeł



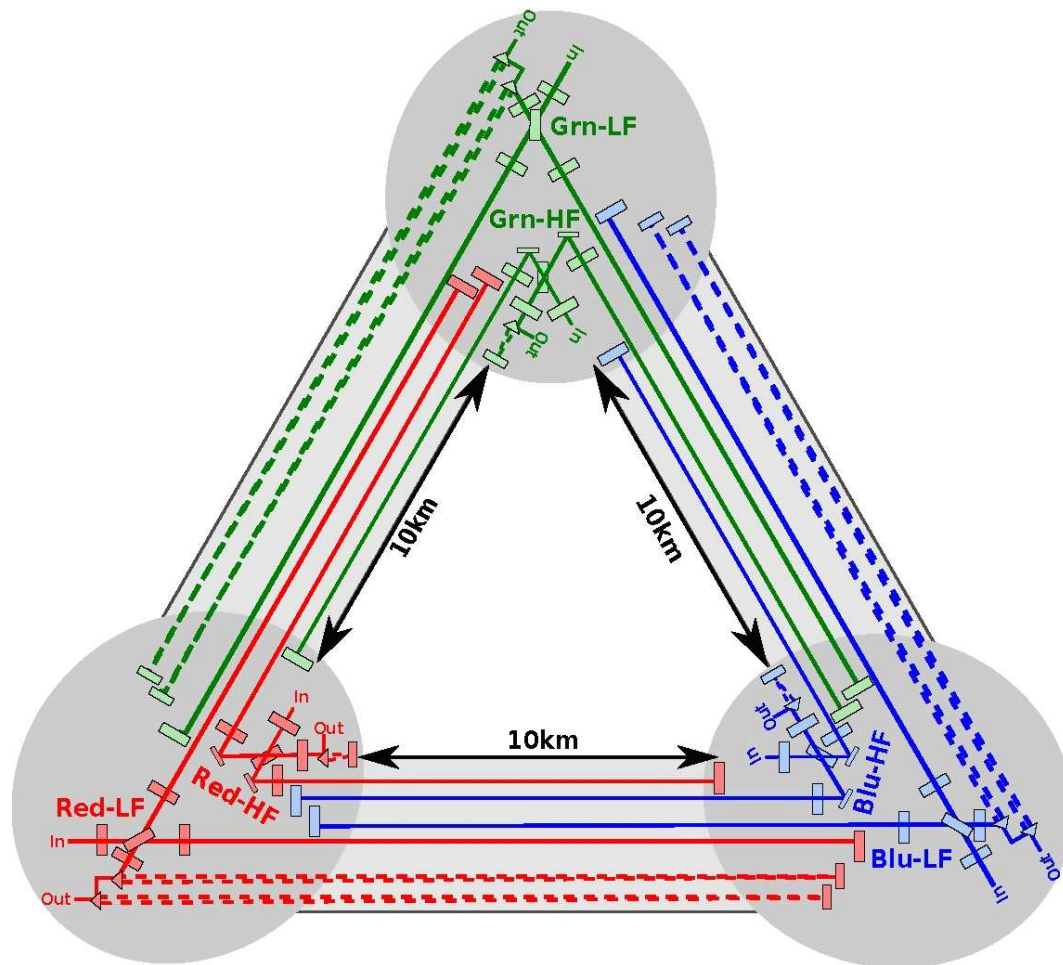
LIGO-Virgo | Frank Elavsky | Northwestern

Einstein Telescope - ET



Przyszłe eksperymenty

Einstein Telescope



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 zapaść w ciągu kilku najbliższych lat.

⇒ produkcja elementów ~ 2020

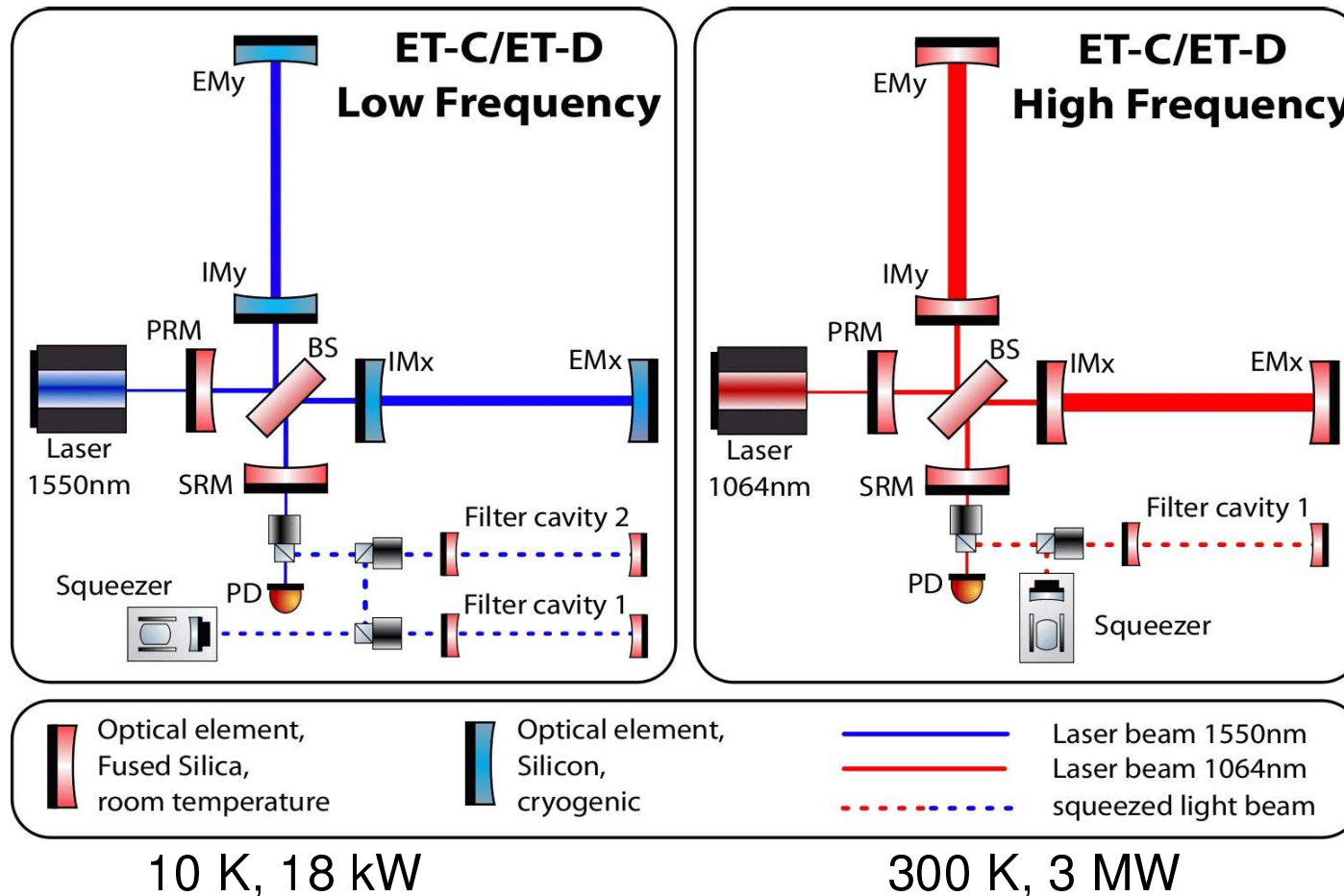
⇒ rozpoczęcie instalacji ~ 2025

⇒ zbierania danych ~ 2030

Przyszłe eksperymenty

Einstein Telescope

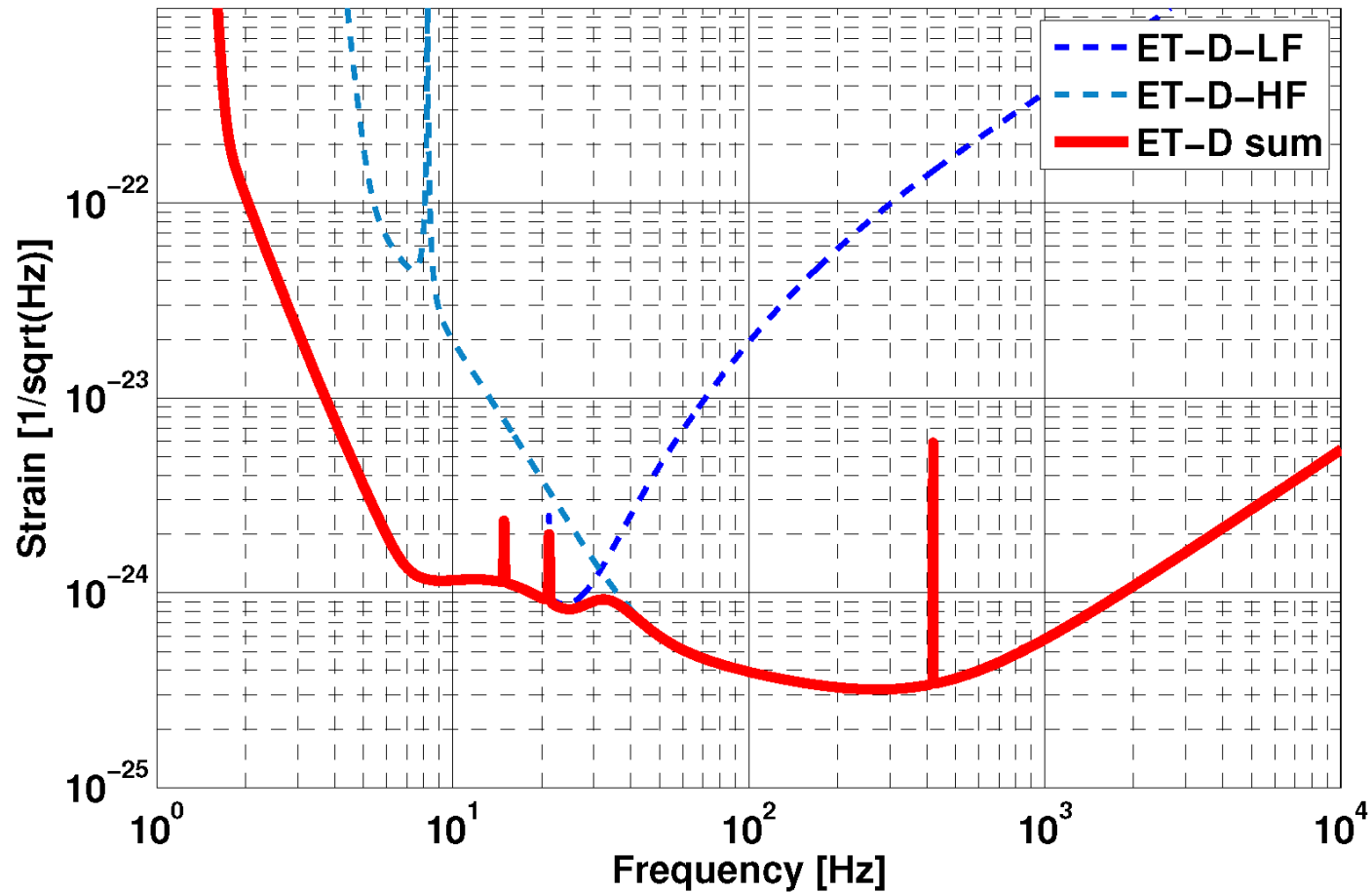
Aby zwiększyć czułość urządzenia zakłada się budowę w każdym wierzchołku dwóch niezależnych interferometrów:



Przyszłe eksperymenty

Einstein Telescope

Oczekiwana czułość całego urządzenia:

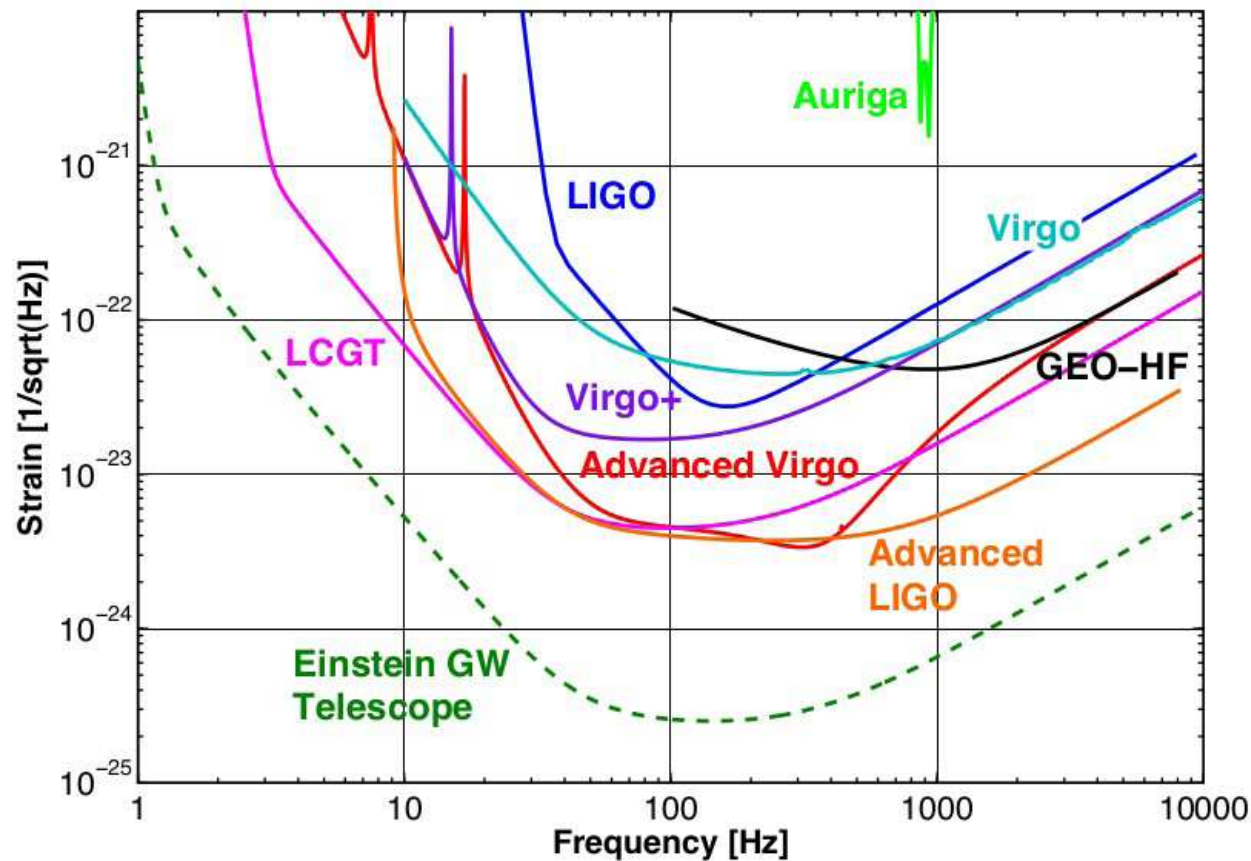


Przyszłe eksperymenty

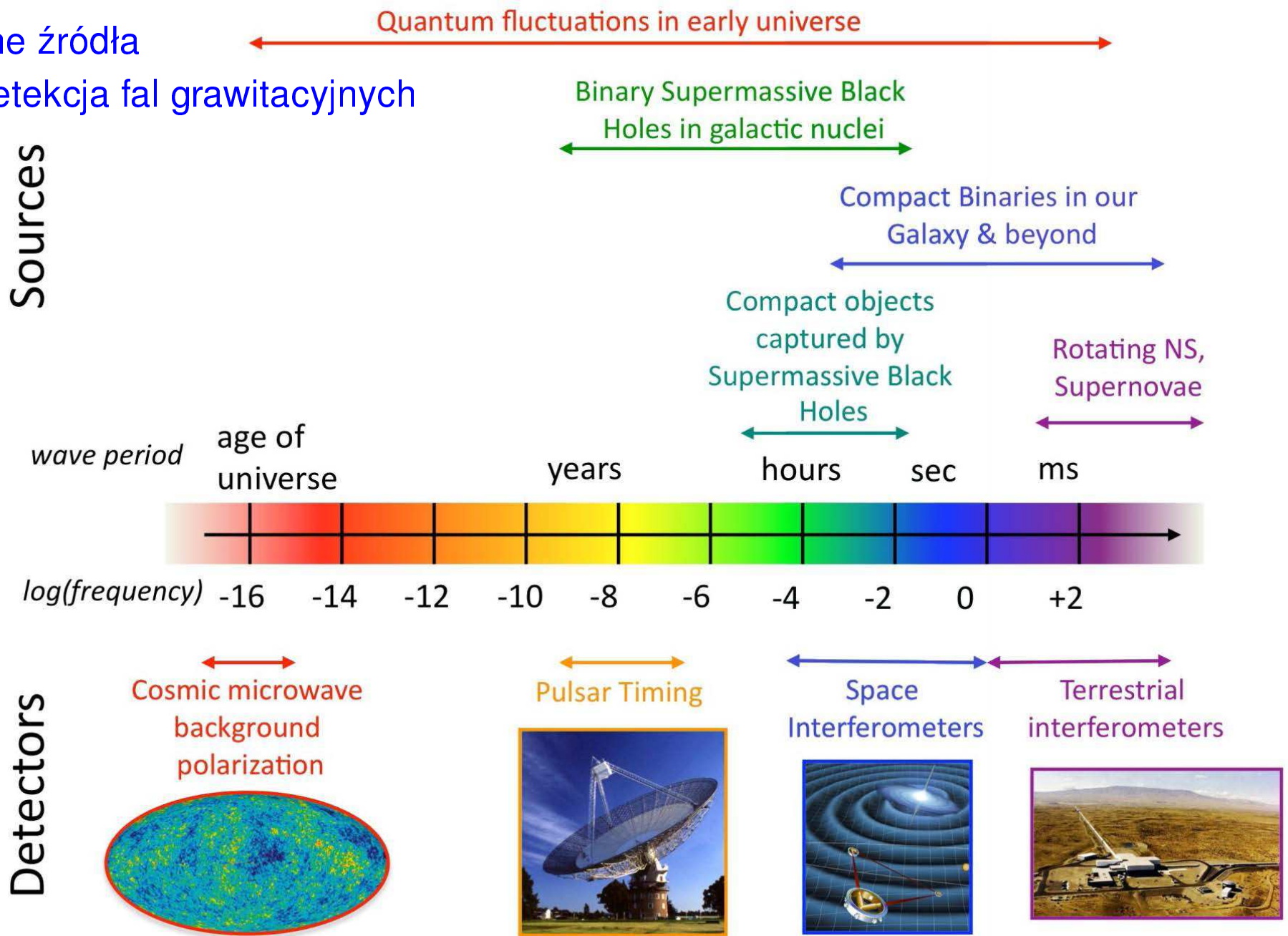
Einstein Telescope

Czułość o rząd wielkości większa niż Advanced LIGO + Virgo

⇒ 10 razy większy zasięg ⇒ 10^3 więcej źródeł !



Potencjalne źródła widmo i detekcja fal grawitacyjnych

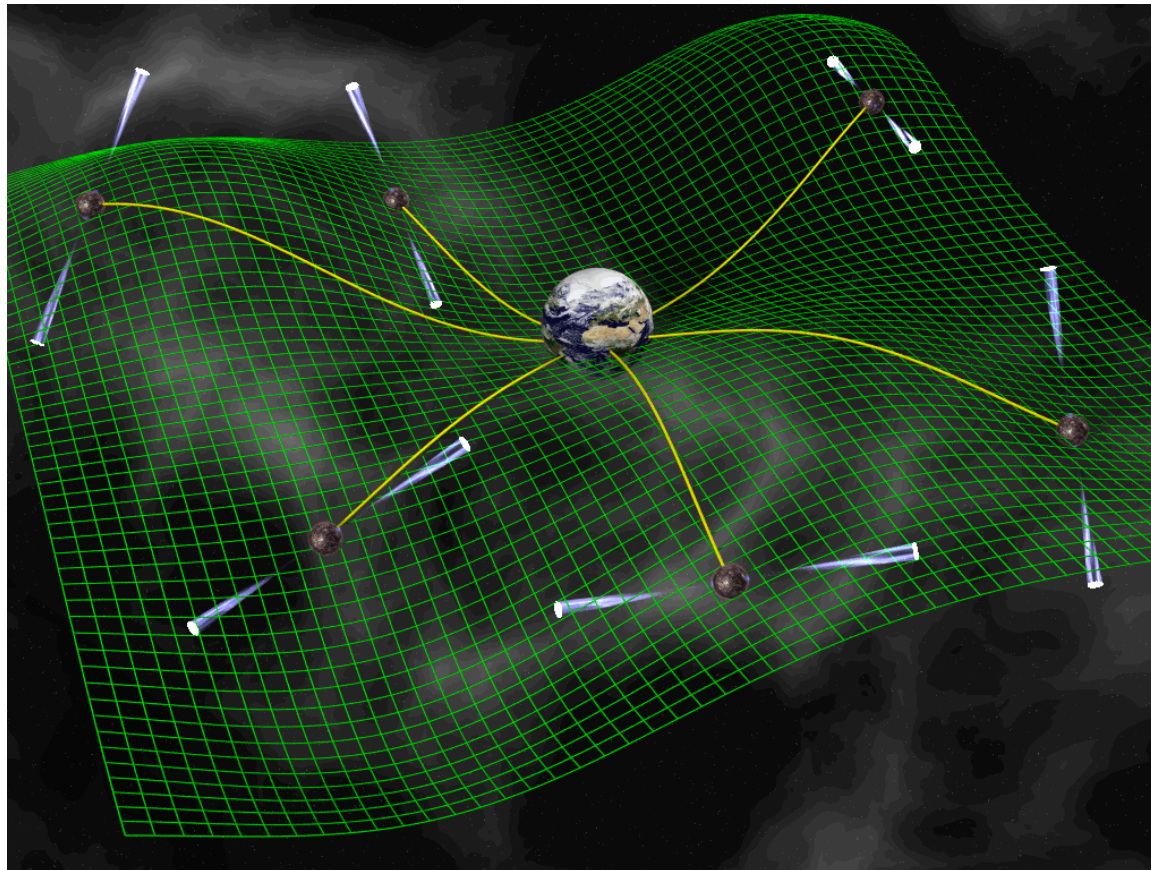


Detekcja fal grawitacyjnych

Obserwacja odległych pulsarów

Długookresowe fale grawitacyjne \Rightarrow modulacja obserwowanych częstości pulsacji

Potencjalne źródła: bardzo masywne układy podwójne ($f \sim 10^{-9} - 10^{-6}$ Hz)



Detekcja fal grawitacyjnych

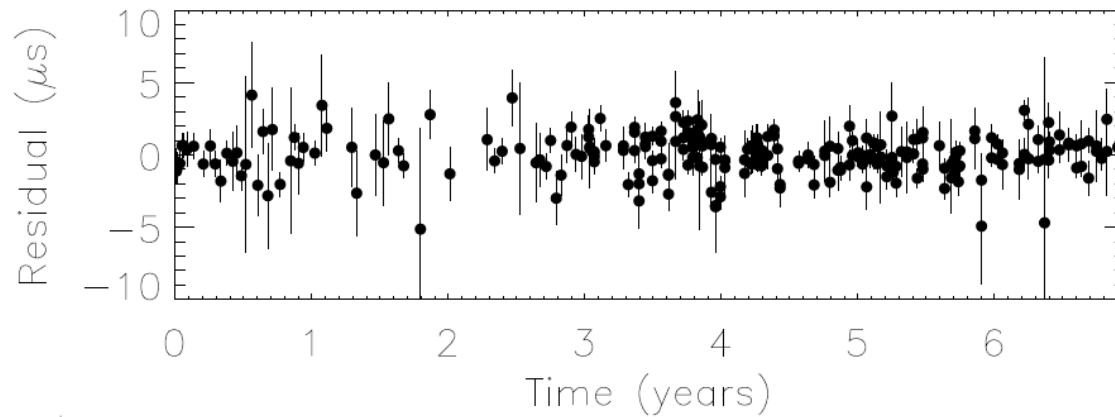
Obserwacja odległych pulsarów

International Pulsar Timing Array - monitorowanie wybranych pulsarów

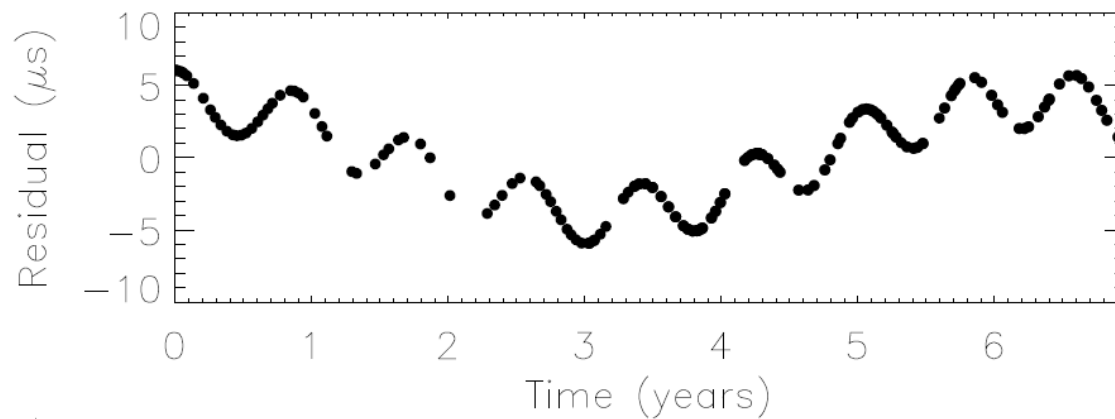


Detekcja fal grawitacyjnych

Obserwacja odległych pulsarów



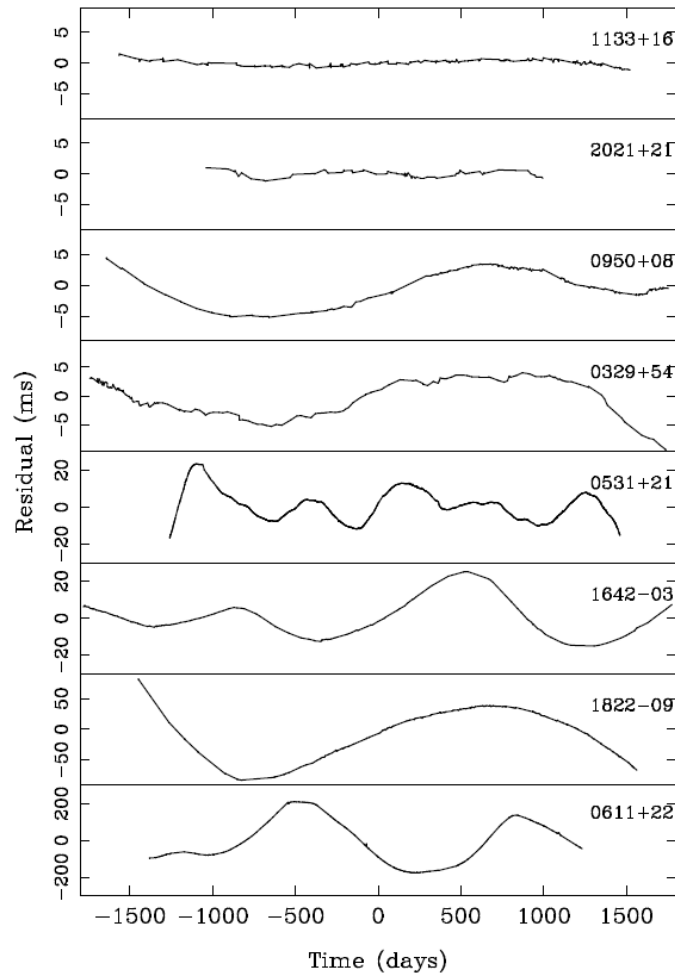
Obserwowane odchylenia okresu pulsara PSR B1855+09



Oczekiwane odchylenia dla fali grawitacyjnej z układu podwójnego czarnych dziur.

Detekcja fal grawitacyjnych

Obserwacja odległych pulsarów



Niestety pulsary nie są idealnymi “zegarami”. Okresy ich zmienności fluktuują.

Ale możemy “wyodrębnić” składową związaną z falami grawitacyjnymi poprzez korelację tych fluktuacji między pulsarami.

Przyszłe eksperymenty

Detektory satelitarne

Detektory naziemne nie są w stanie mierzyć fal o częstotliwości poniżej ok. 10 Hz z uwagi na przytłaczające tło sejsmiczne.

Najsilniejsze sygnały oczekiwane z układów podwójnych bardzo masywnych czarnych dziur \Rightarrow emisja w zakresie mHz...

Jedyny sposób - eksperyment "bez podparcia", w kosmosie...

LISA Laser Interferometer Space Antenna

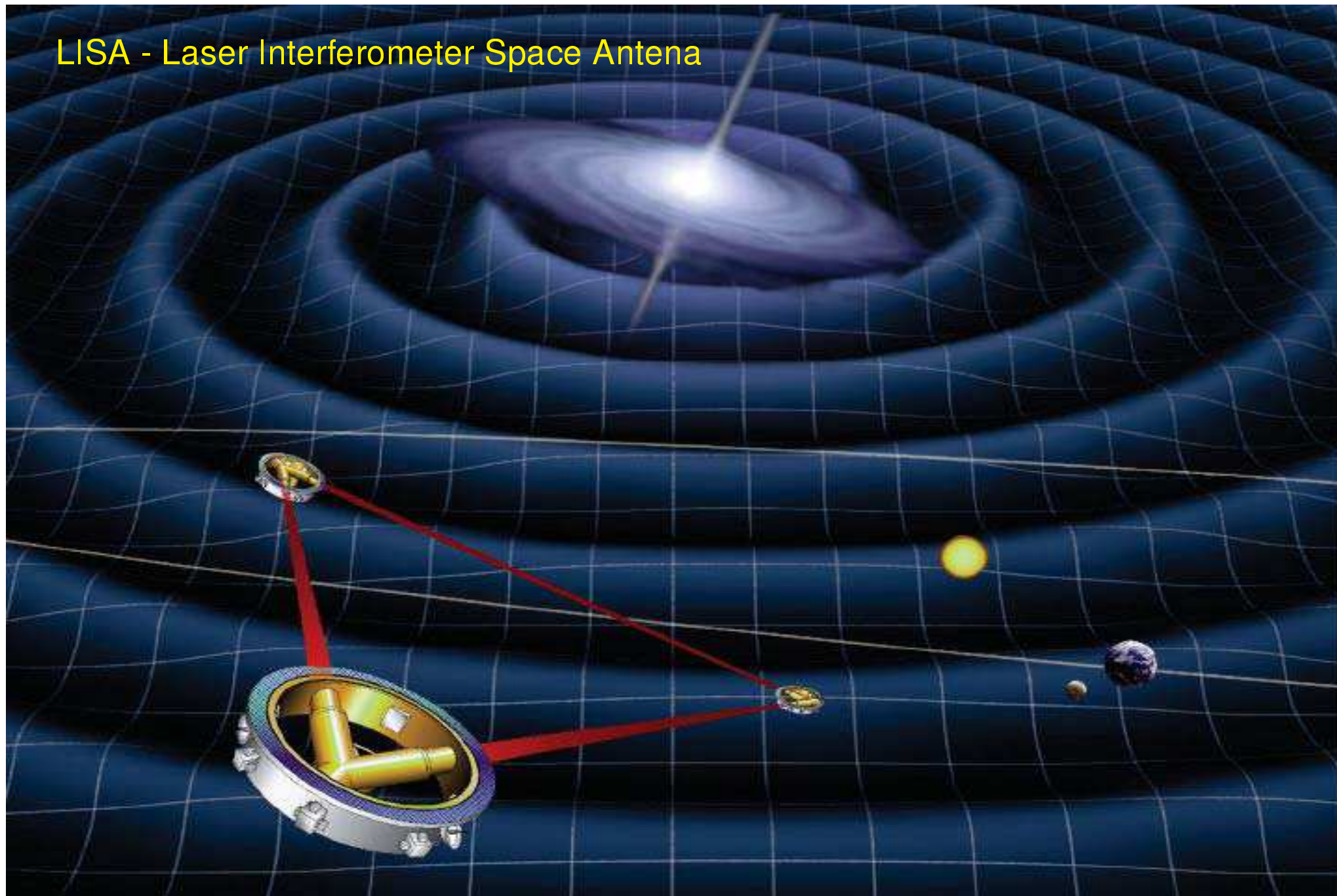
Projekt NASA+ESA rozwijany od lat 1990.

Trzy stacje satelitarne w układzie trójkąta o boku 5 mln. km, na orbicie Słonecznej 20° za Ziemią.

Przewidziany przez ESA do wystrzelenia w ~ 2018 .

Niestety, w kwietniu 2011, z powodu cięć finansowych, NASA wycofała się ze współpracy...

LISA - Laser Interferometer Space Antenna

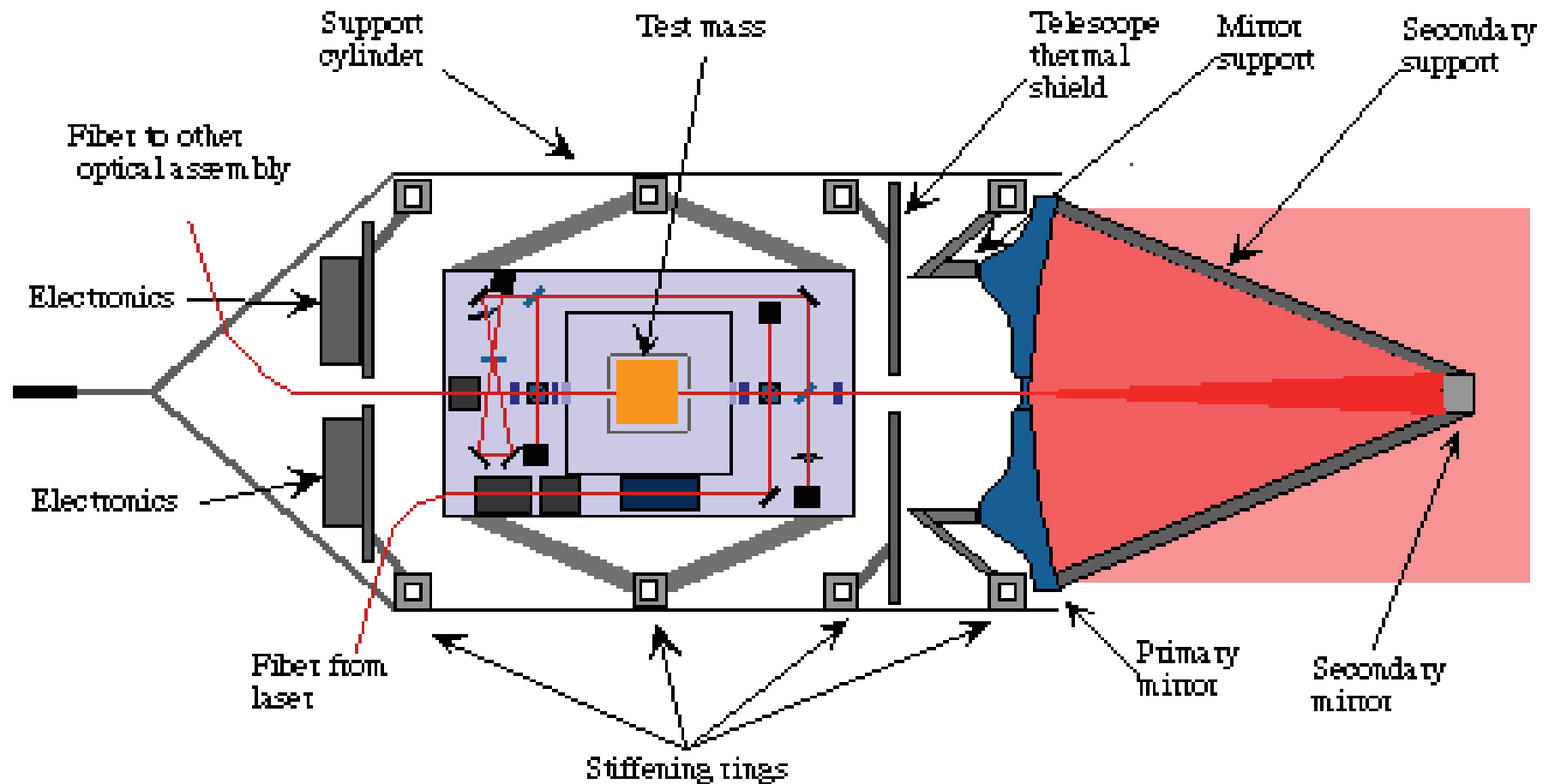


Przyszłe eksperymenty

LISA

Schemat pojedynczego modułu pomiarowego detektora LISA.

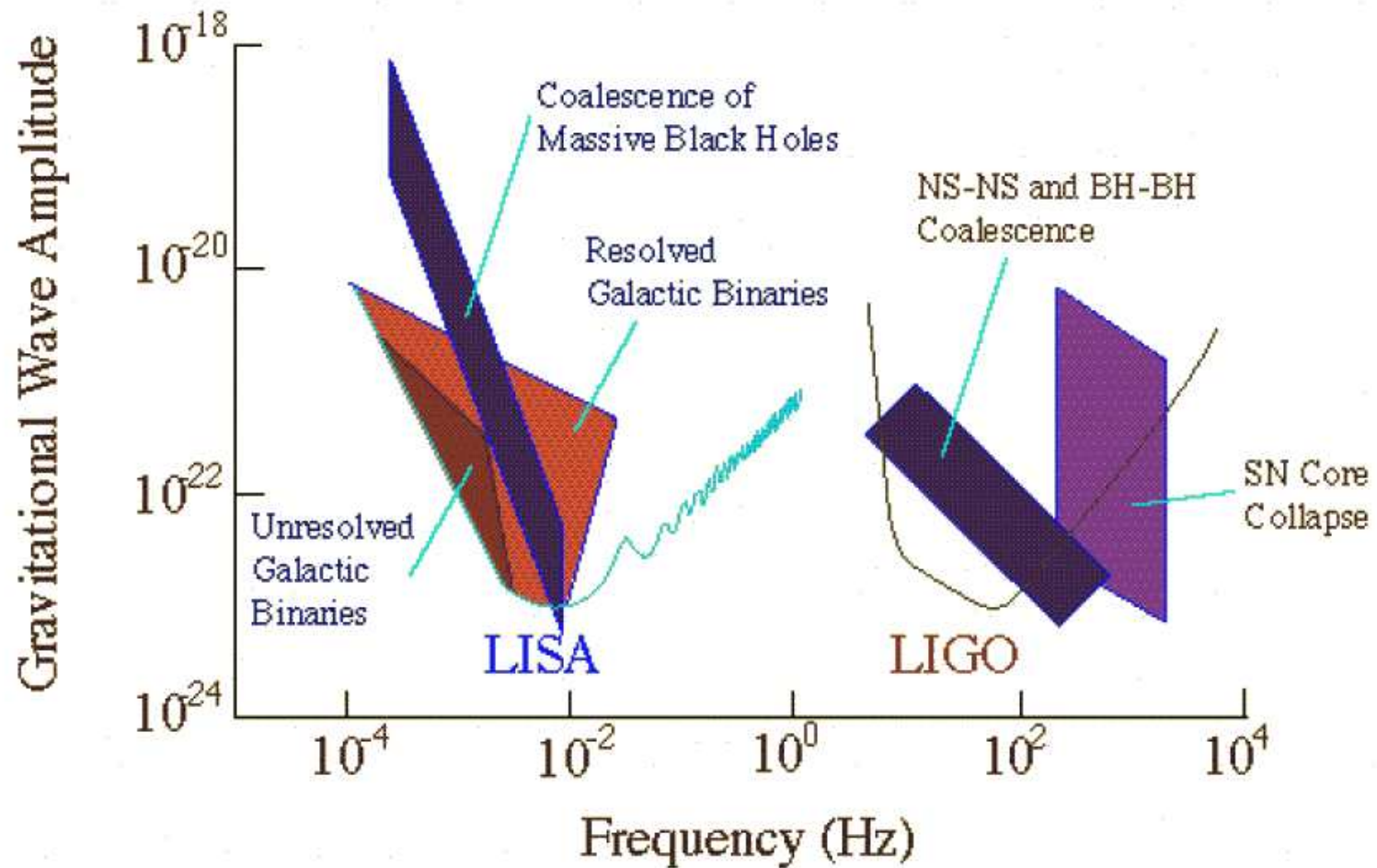
Interferometr mierzy odległość między całkowicie odizolowanymi “masami testowymi”



Przyszłe eksperymenty

LISA

Oczekiwana czułość i zakres częstotliwości w projekcie LISA



Przyszłe eksperymenty

eLISA

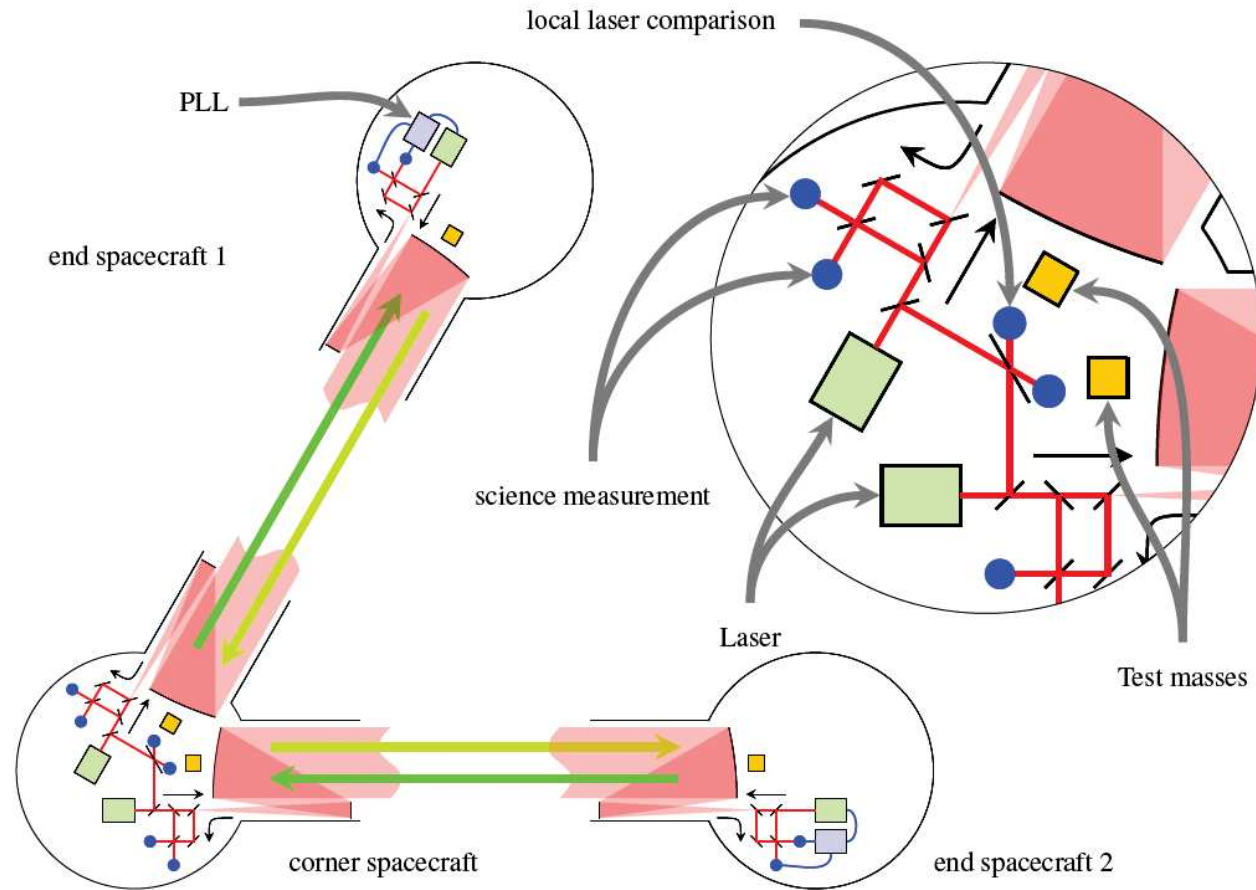
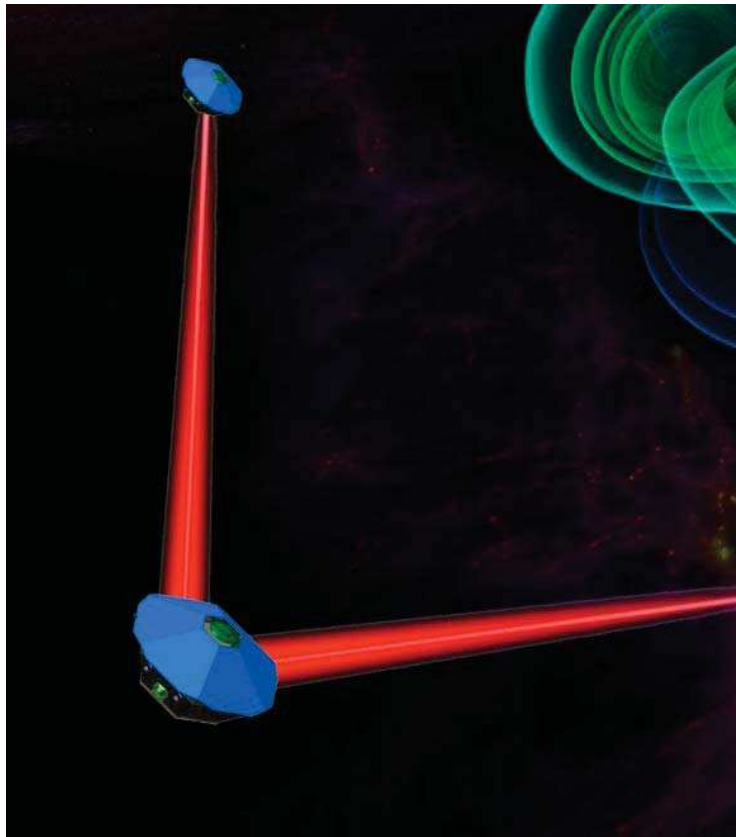
Po wycofaniu NASA projekt musiałby być przycięty do możliwości budżetowych ESA

Parametr	LISA	eLISA
Długość ramienia	5 mln. km	1 mln. km
Liczba linii laserowych	6	4
Średnica zwierciadeł	40 cm	20 cm
Dokładność stabilizacji	$0.6 \frac{fm}{s^2 \sqrt{Hz}}$	$3 \frac{fm}{s^2 \sqrt{Hz}}$
Odległość od Ziemi	20°	9°
Nominalny czas misji	5 lat	2 lata
Planowane wystrzelenie	2018	2034

Przyszłe eksperymenty

eLISA

Schemat układu interferometrów eLISA



Przyszłe eksperymenty

LISA Pathfinder

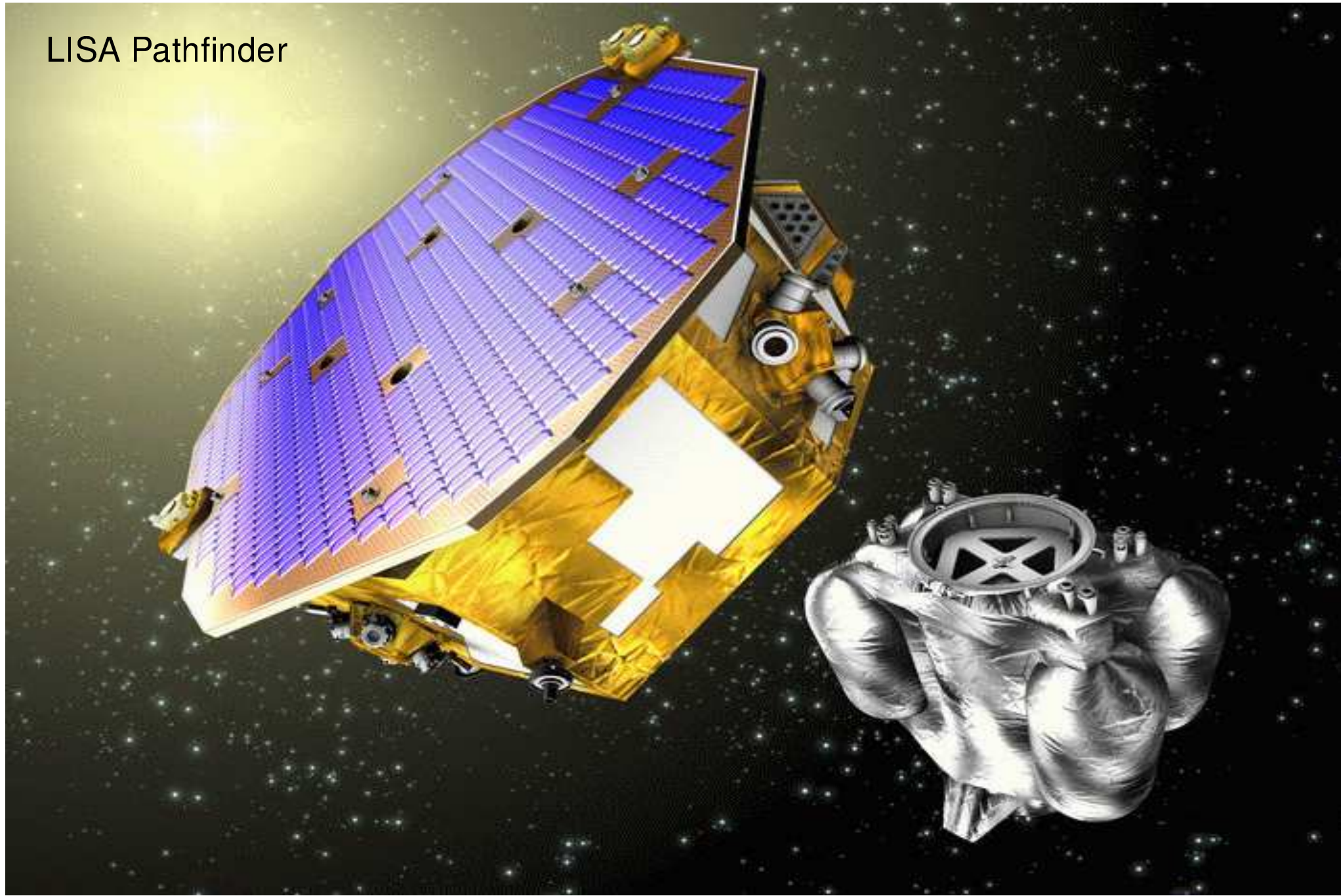
3 grudnia 2015 wystrzelony został próbnik testowy “LISA Pathfinder”, który miał przetestować kluczowe dla projektu podzespoły:

- mikro silniki
- układ kontroli pozycji
- układ optyczny
- czujniki optyczne
- czujniki inercyjne
- oprogramowanie
w szczególności system redukcji zaburzeń

8 marca 2016 satelita rozpoczął pomiary w 1 punkcie Lagranga (LP1).

Testowy interferometr ma tylko... 38cm, więc nie dostarczy żadnych wyników fizycznych

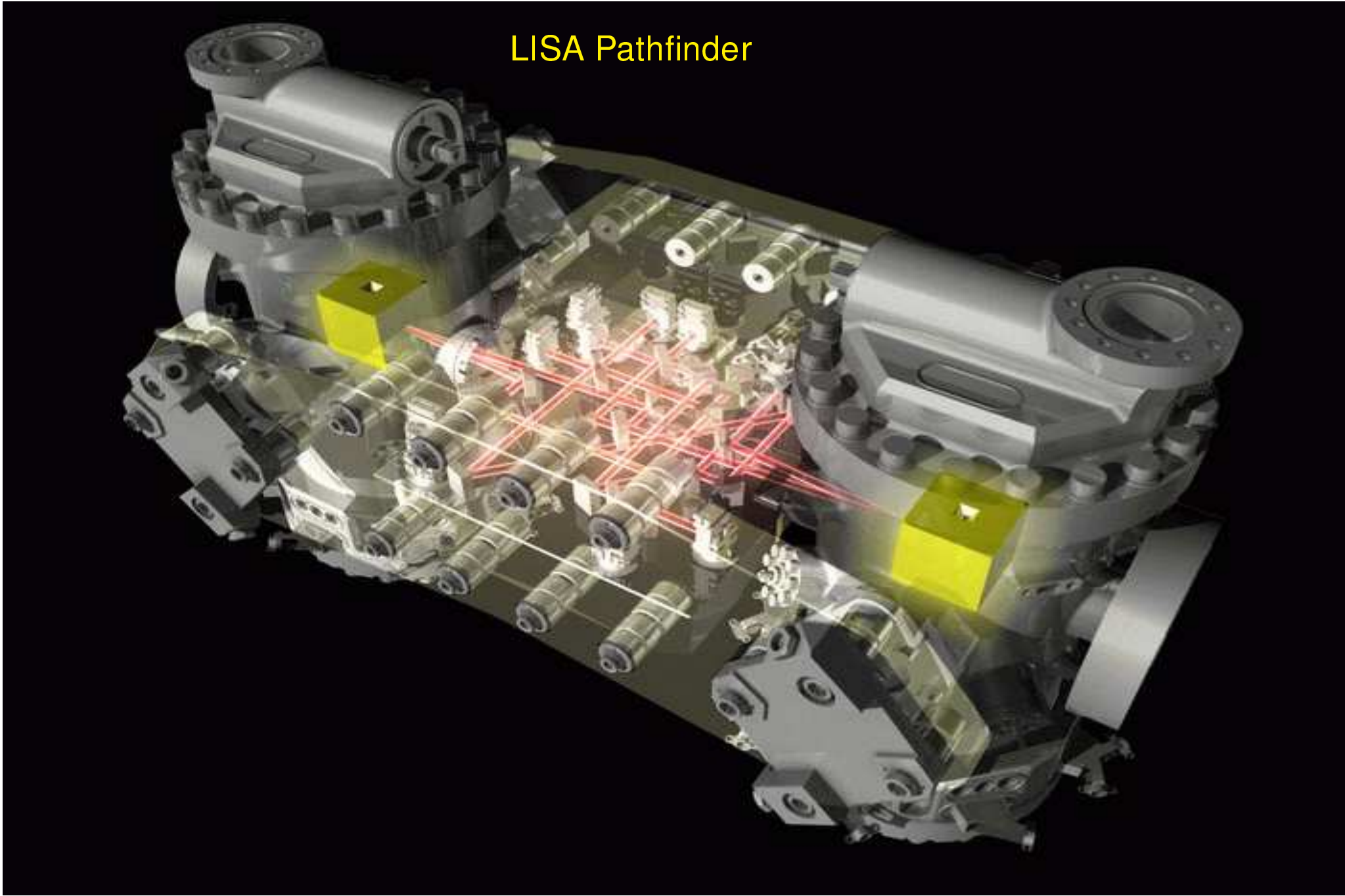
LISA Pathfinder



LISA Pathfinder



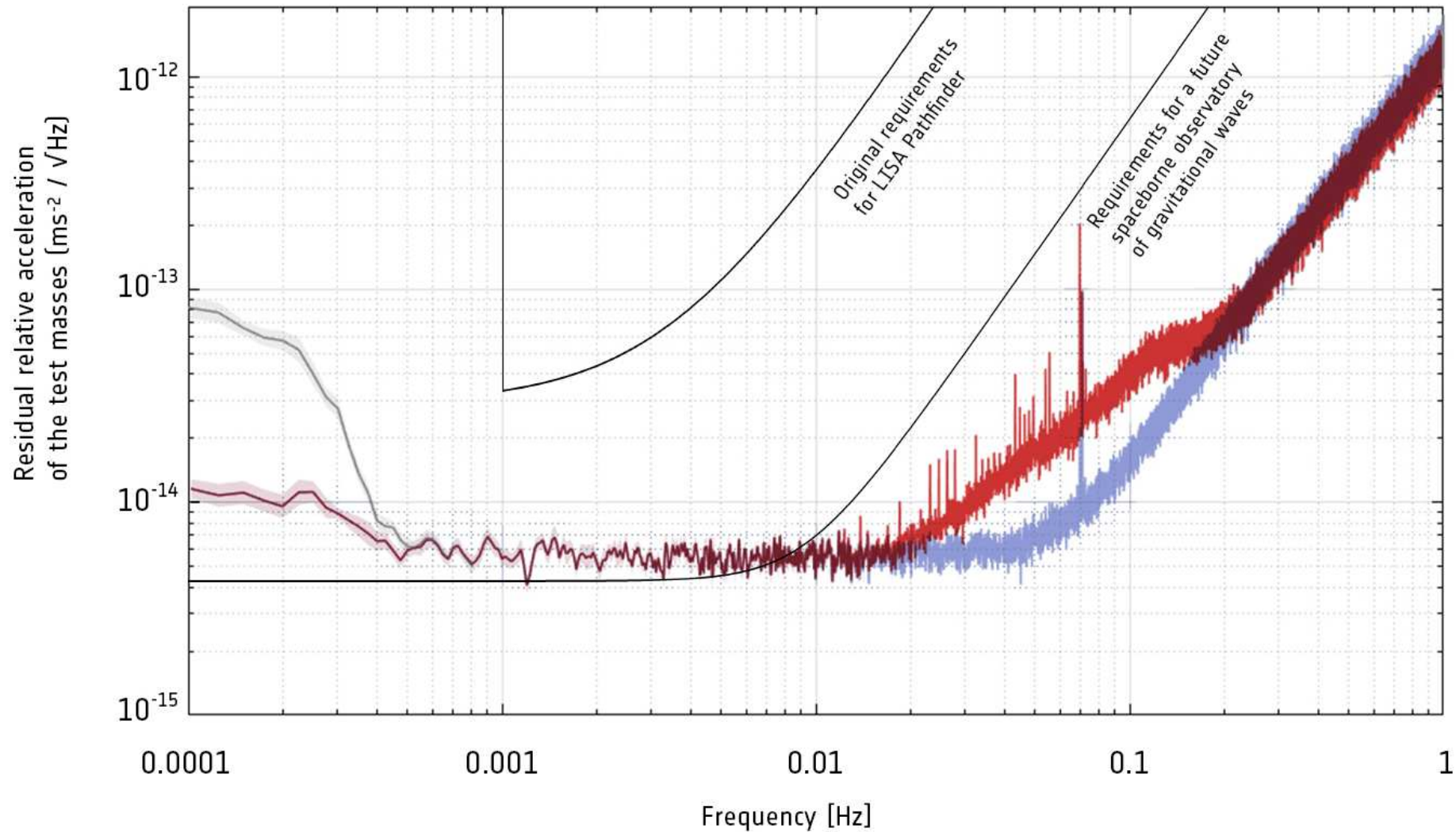
LISA Pathfinder



LISA Pathfinder

Wyniki

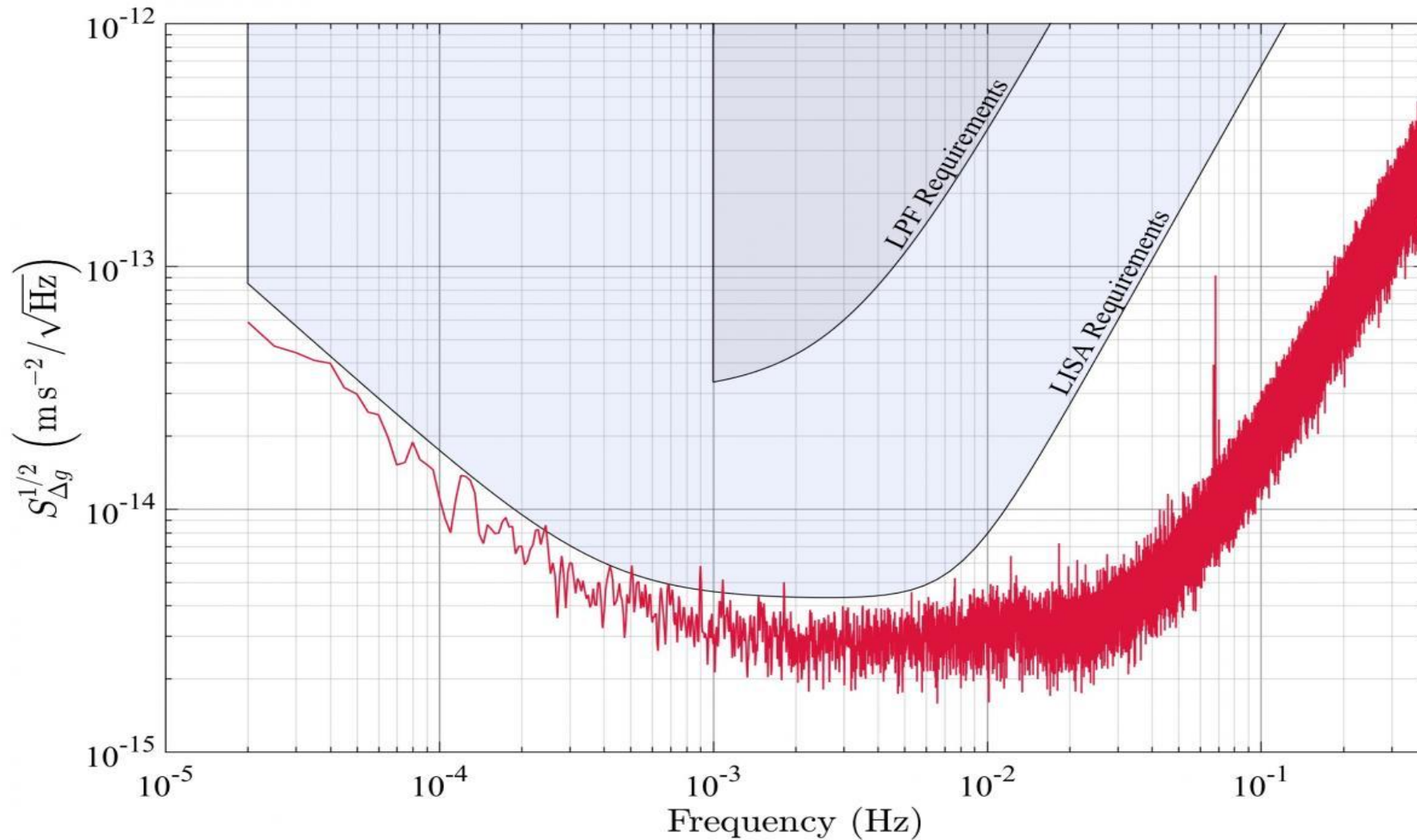
Pierwsze pomiary: 7 czerwca 2016



LISA Pathfinder

Wyniki

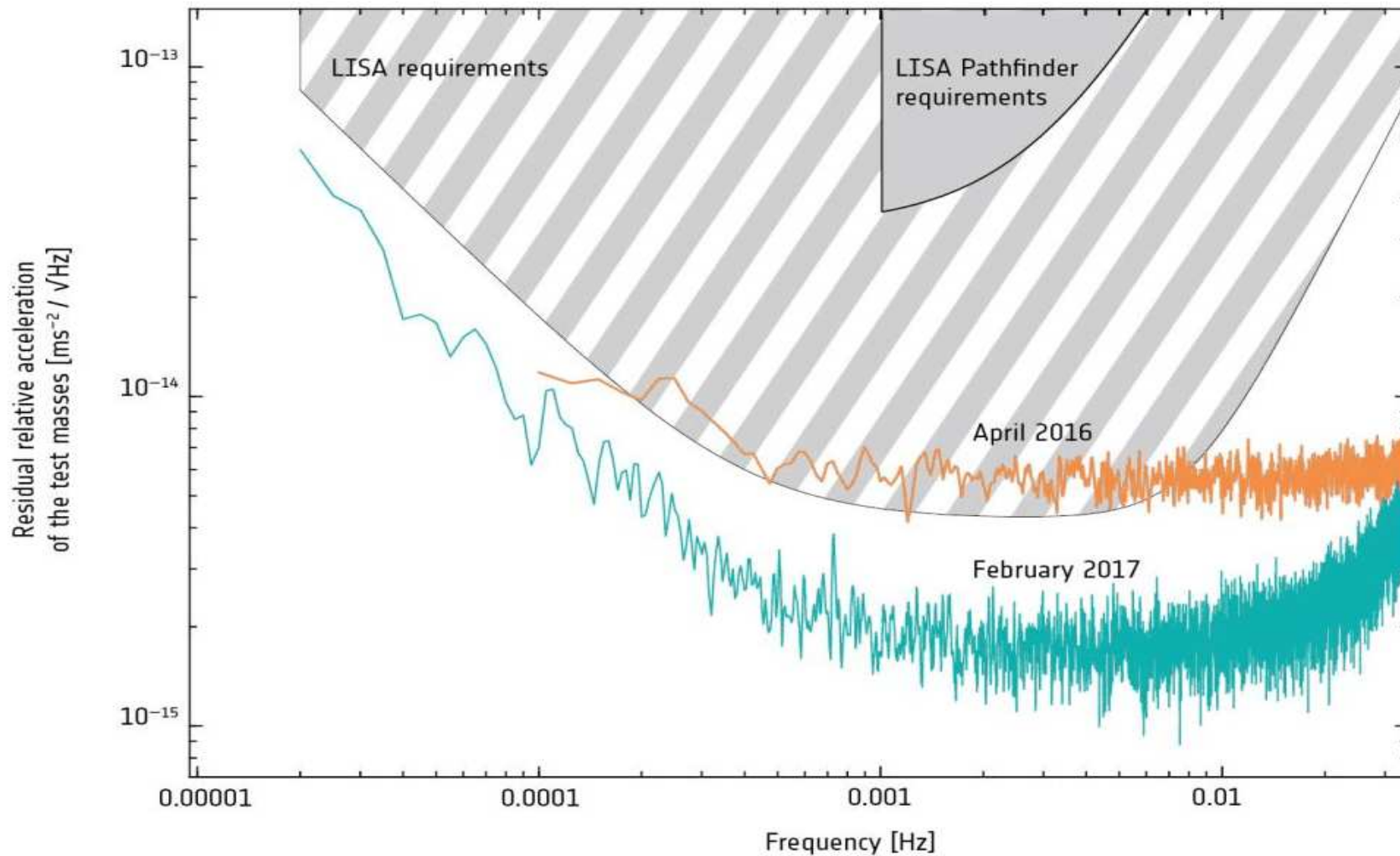
nowe wyniki: styczeń 2017



LISA Pathfinder

Wyniki

misja zakończona w lipcu 2017



LISA

Co dalej?

W październiku 2016 ESA ogłosiła konkurs na projekty dużych misji kosmicznych

Konsorcjum LISA złożyło projekt budowy kosmicznego interferometru w styczniu 2017.

Projekt 'LISA-2' został wybrany przez ESA jako kolejna duża misja 20 czerwca 2017.

Ostateczne zatwierdzenie oczekiwane jest nie później niż w 2025 roku,
a początek misji w 2034.

Do konsorcjum przyłączyły się ponownie zespoły z USA (w tym NASA) i Australii...

LISA

Projekt LISA-2

Nowy projekt został znów rozbudowany:

Parametr	LISA	eLISA	LISA-2
Długość ramienia	5 mln. km	1 mln. km	2.5 mln. km
Liczba linii laserowych	6	4	6
Średnica zwierciadeł	40 cm	20 cm	30 cm
Dokładność stabilizacji	$0.6 \frac{fm}{s^2\sqrt{Hz}}$	$3 \frac{fm}{s^2\sqrt{Hz}}$	$3 \frac{fm}{s^2\sqrt{Hz}}$
Odległość od Ziemi	20°	9°	19-23°
Nominalny czas misji	5 lat	2 lata	4-10 lat
Planowane wystrzelenie	2018	2034	2034



LISA

Laser Interferometer Space Antenna

Przyszłe eksperymenty

Dalsze koncepcje satelitarne

Rozważanych jest już szereg kolejnych projektów:

- ALIA - Advanced Laser Interferometer Antenna
Podobny do LISA, ale wyższa czułość mimo krótszego ramienia
- ALIAS- Advanced Laser Interferometer Antenna in Stereo
Dwa układy ALIA oddalone o 40° (na orbicie)
- LISAS - Laser Interferometer Space Antenna in Stereo
Dwa układy LISA oddalone o 40° (na orbicie)
- BBO - Big Bang Observer (BBO)
Cztery układy typu LISA - dwa nakładające się (“Gwiazda Dawida”), kolejne co 60°

Nowe układy powinny pokryć zakres pośrednich częstości 0.1 - 10 Hz

BBO powinien wykrywać układy podwójne o $M \geq 1M_\odot$ do odległości $z \sim 3$

Duże odległości \Rightarrow możliwość dokładnego określenia pozycji źródła