

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład XIV

- Poszukiwanie fal grawitacyjnych
- GW150914 i kolejne przypadki
- Perspektywy badań

Fale grawitacyjne

Własności

Fala grawitacyjna zachowuje się podobnie jak fale elektromagnetyczne

- porusza się z tą samą prędkością
- podlega odchyleniom na skutek zakrzywienia czasoprzestrzeni
- podlega przesunięciu ku czerwieni (np. rozszerzanie się Wszechświata)
- niosą energię, pęd i moment pędu (!)

Jednak fala grawitacyjna w bardzo niewielkim stopniu podlega absorbcji w materii

⇒ dlatego jej wykrycie jest tak trudne

⇒ detektory rezonansowe

Przechodząca fala grawitacyjna deformuje czasoprzestrzeń ⇒ nie powoduje jednak przesunięć spoczywających obiektów, nie wprawia ich w ruch

⇒ deformacja przestrzeni skutkuje jedynie zmianą odległości między obiektami

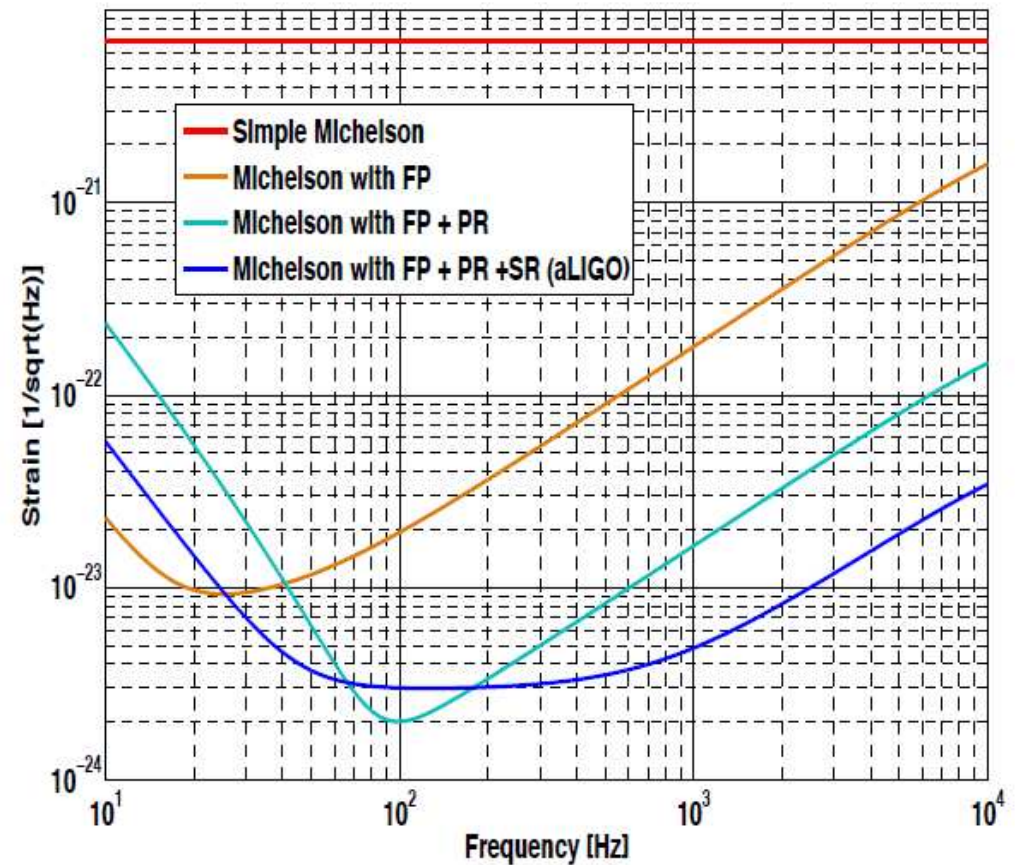
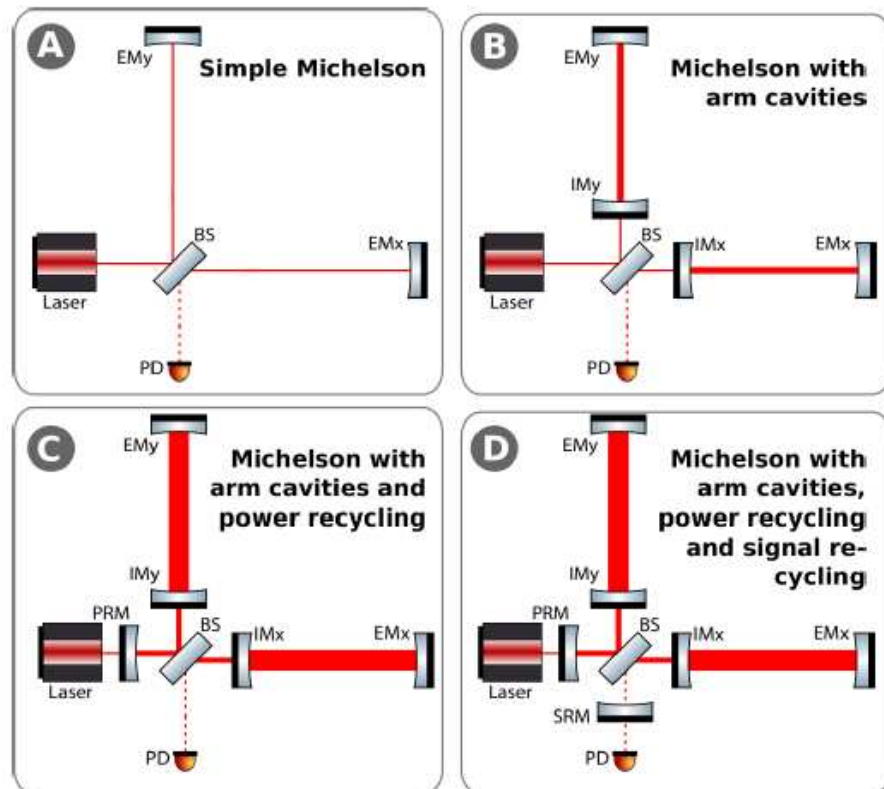
⇒ pomiary interferometryczne

Detekcja fal grawitacyjnych

Interferometry

Nie da się osiągnąć wymaganych parametrów dla “zwykłego” interferometru.

Trzeba zastosować wnęki rezonansowe (L) i wyeliminować straty mocy (P_{in})

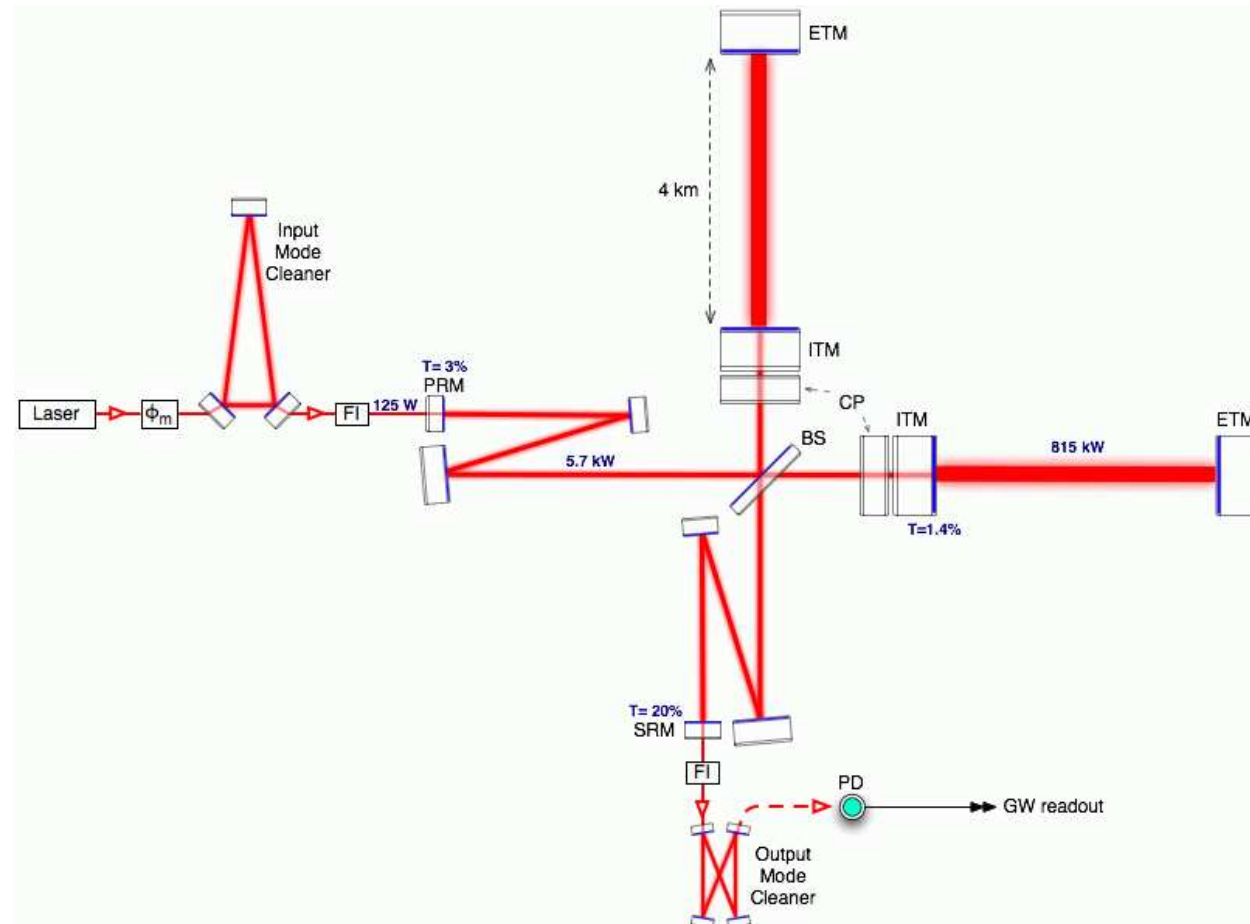


Detekcja fal grawitacyjnych

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

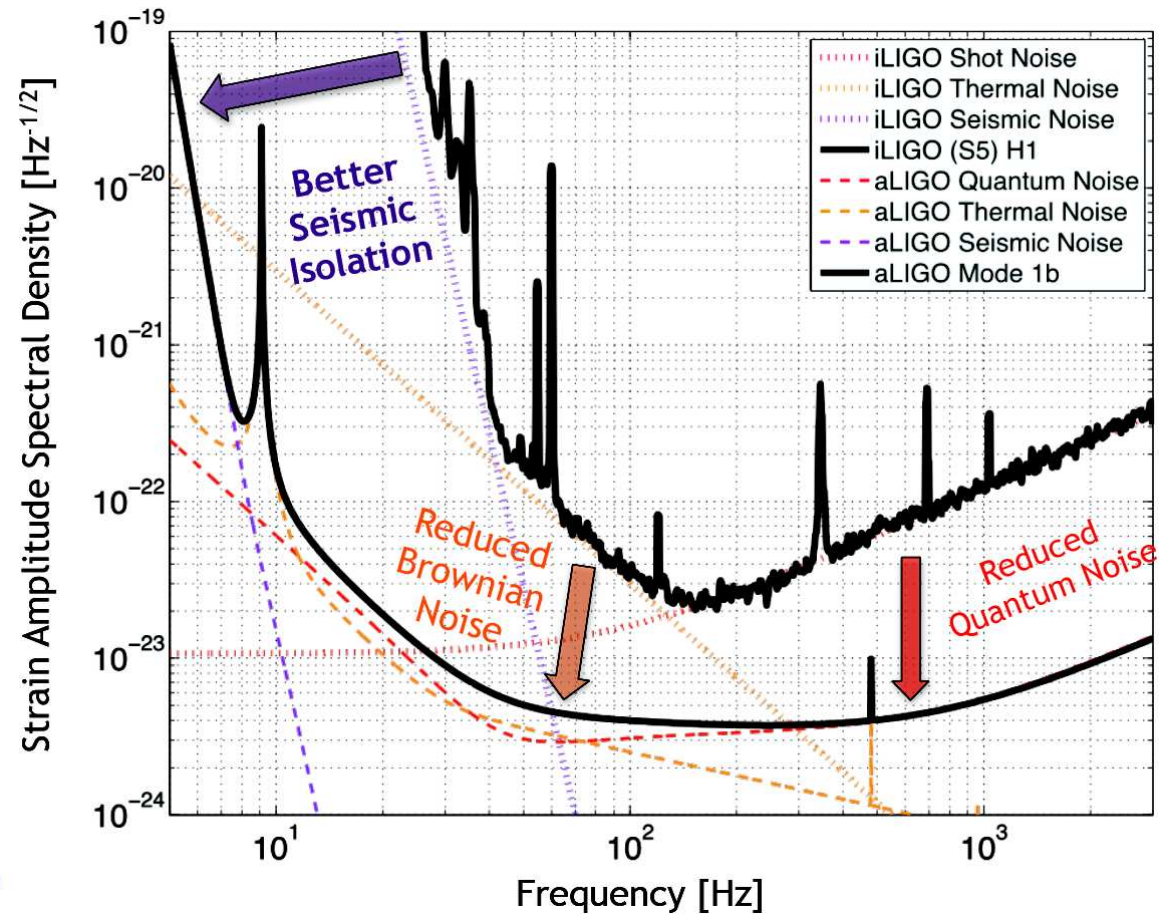
Advanced LIGO



Detekcja fal grawitacyjnych

Advanced LIGO

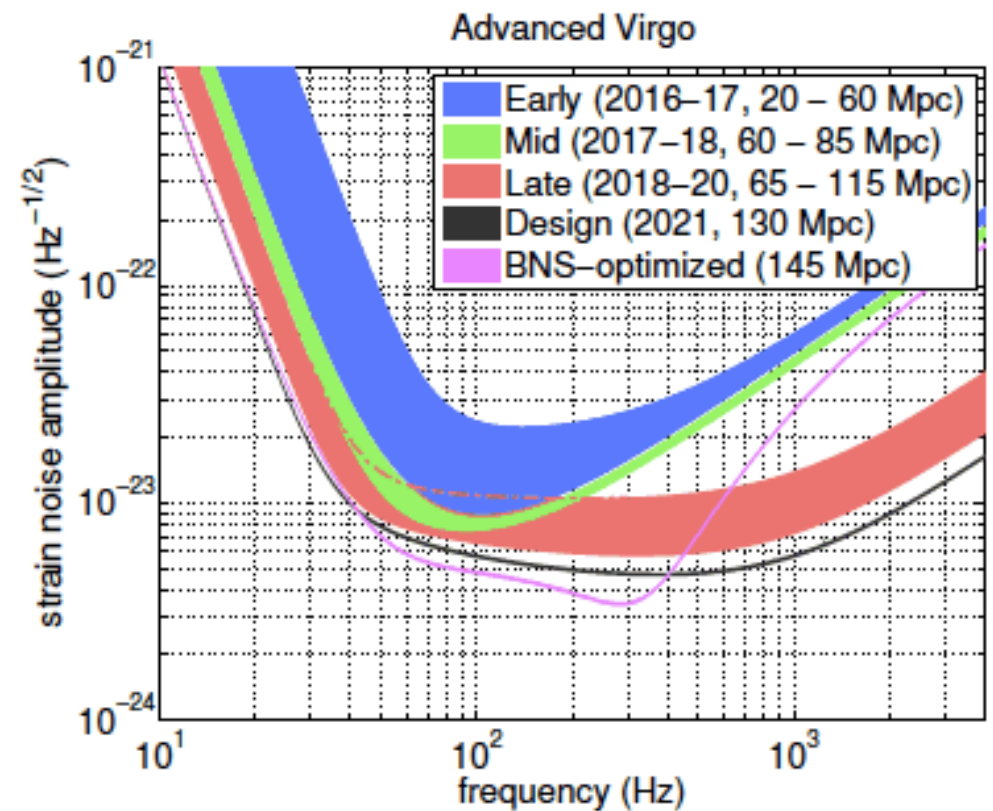
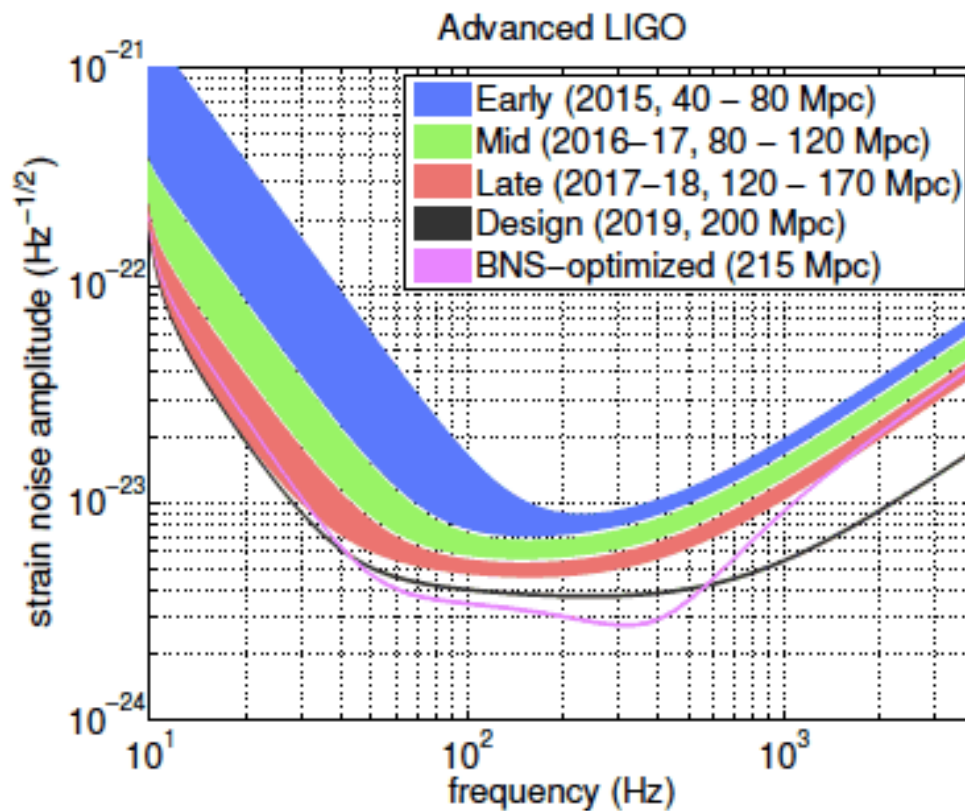
Zwiększenie czułości o rząd wielkości, poszerzenie zakresu częstości



Detekcja fal grawitacyjnych

Advanced LIGO i Virgo

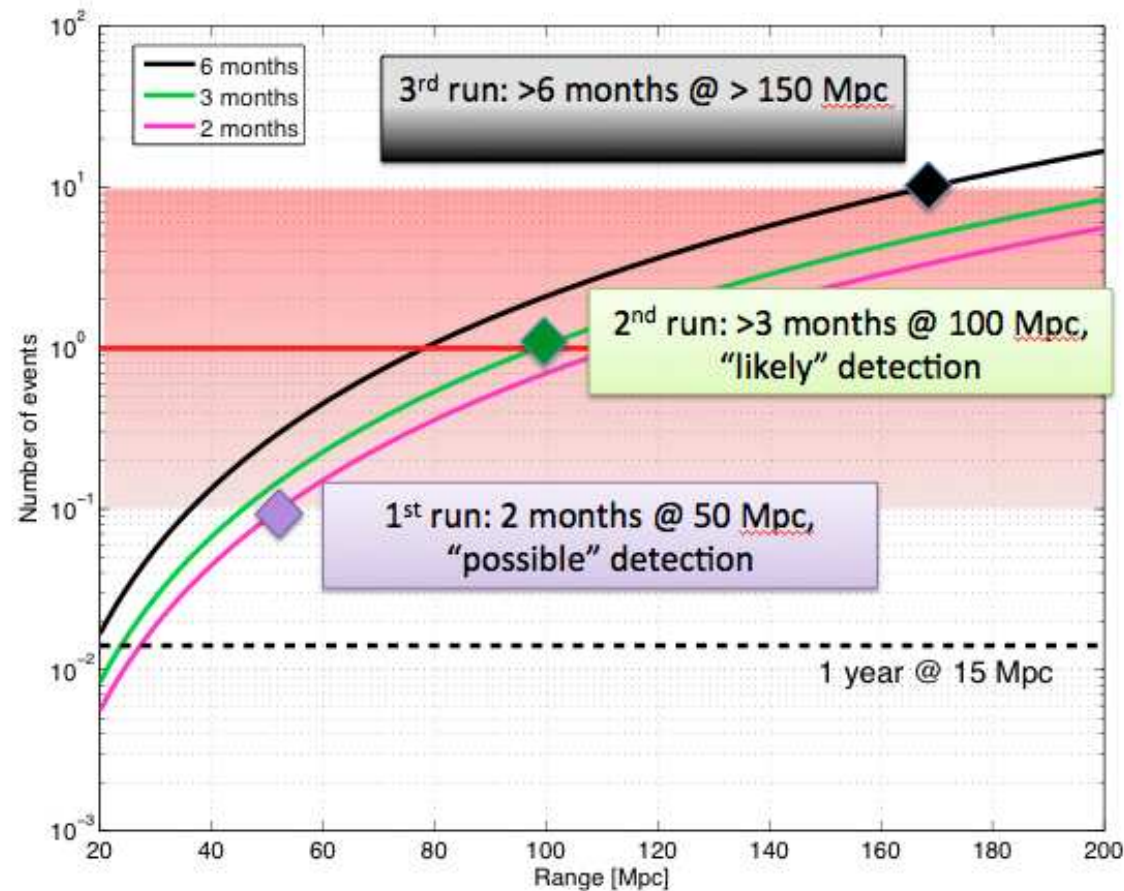
Zakładana czułość po modernizacji na kolejnych etapach uruchamiania:



Detekcja fal grawitacyjnych

Advanced LIGO

Oczekiwana liczba detekcji fal grawitacyjnych na kolejnych etapach:



Fale grawitacyjne

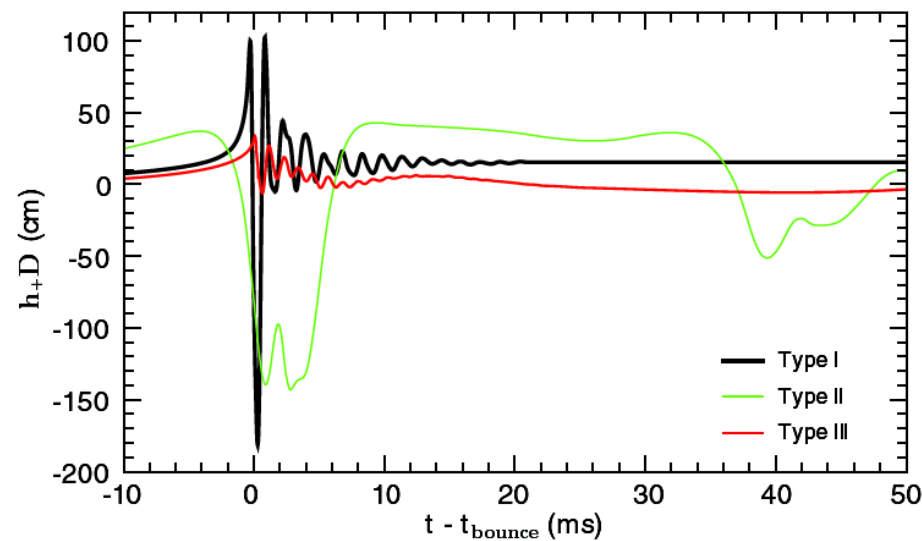
Rozważane źródła

W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd \Rightarrow wybuchy (także związane z GRB)

Najsilniejsze. Krótki impuls o bardzo zróżnicowanym profilu...

[Dimmelmeier et al (2002)]



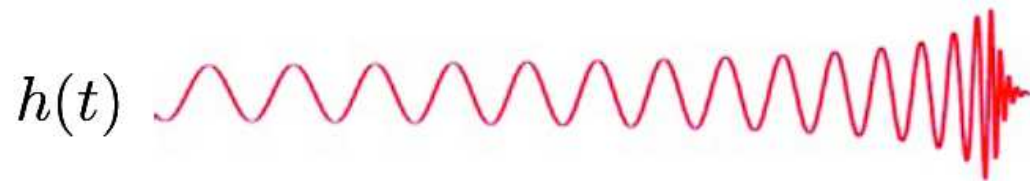
Fale grawitacyjne

Rozważane źródła

W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd \Rightarrow wybuchy (także związane z GRB)
- Zderzenia/złanie się masywnych obiektów

Wciąż silne. Dłuższy impuls, który można modelować...



Fale grawitacyjne

Rozważane źródła

W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd \Rightarrow wybuchy (także związane z GRB)
- Zderzenia/złanie się masywnych obiektów
- Ciągłą emisję wirujących układów

Słabe, ale periodyczne. Możemy analizować długie okresy danych.
Może być widoczny efekt Dopplera związany z ruchem Ziemi...



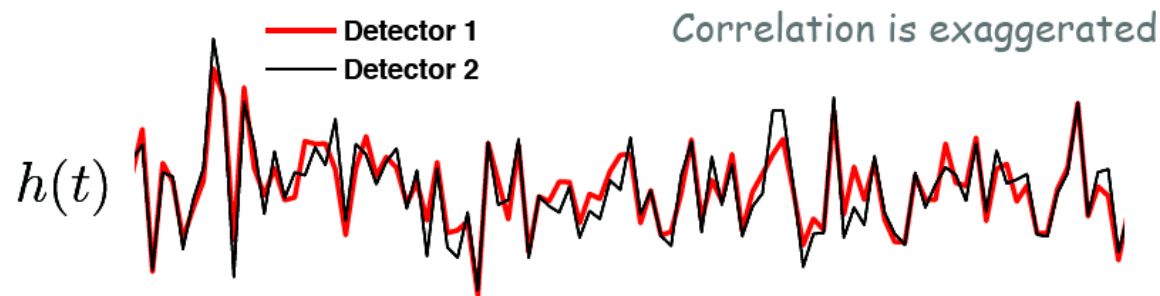
Fale grawitacyjne

Rozważane źródła

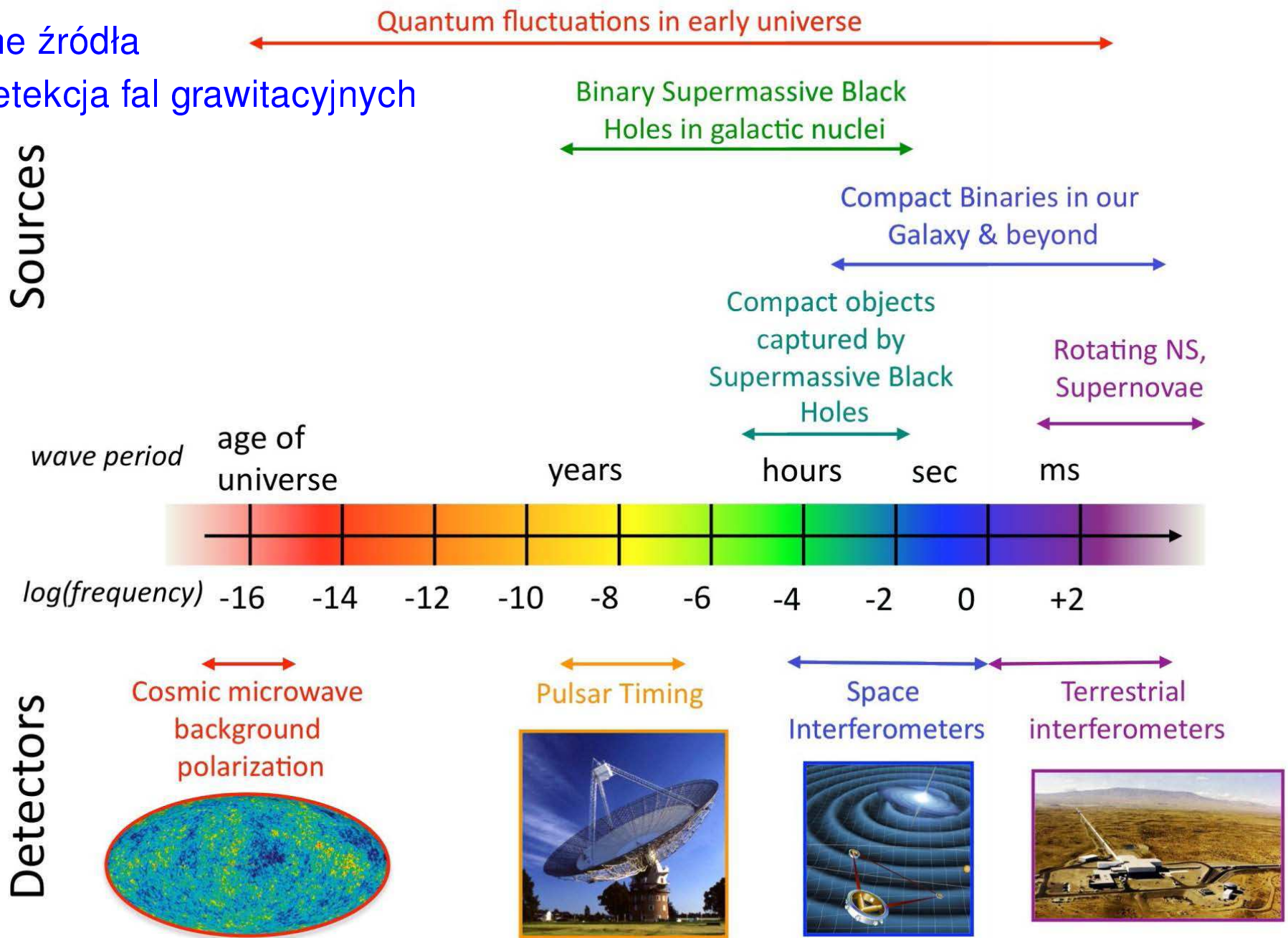
W poszukiwaniu fal grawitacyjnych rozważa się różnego rodzaju źródła

- Zapadnięcia grawitacyjne masywnych gwiazd \Rightarrow wybuchy (także związane z GRB)
- Zderzenia/złanie się masywnych obiektów
- Ciągłą emisję wirujących układów
- Grawitacyjne promieniowanie tła wyemitowane na wczesnych etapach ewolucji Wszechświata

Bardzo słabe, ale może stać się widoczne przez korelację różnych detektorów.



Potencjalne źródła widmo i detekcja fal grawitacyjnych

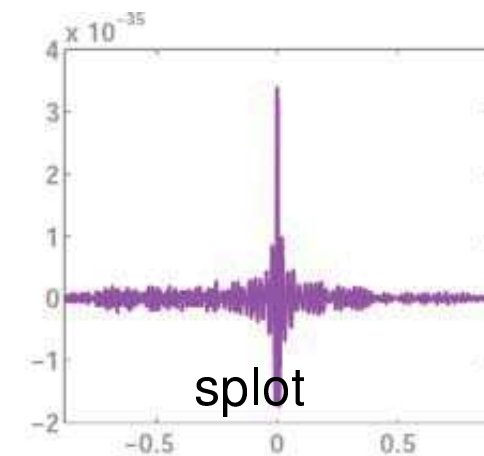
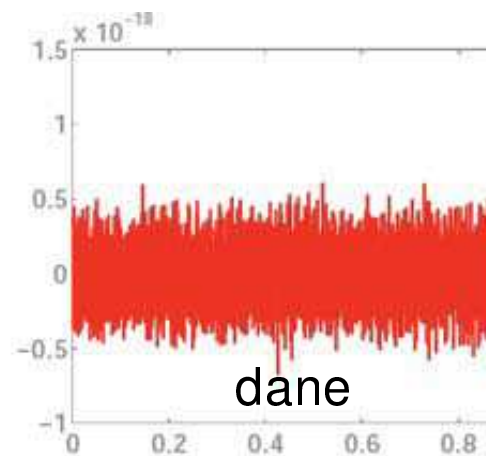
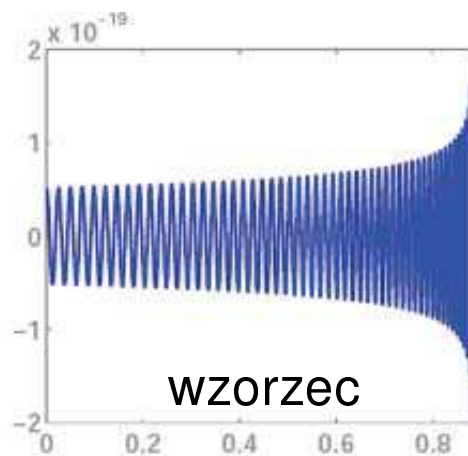
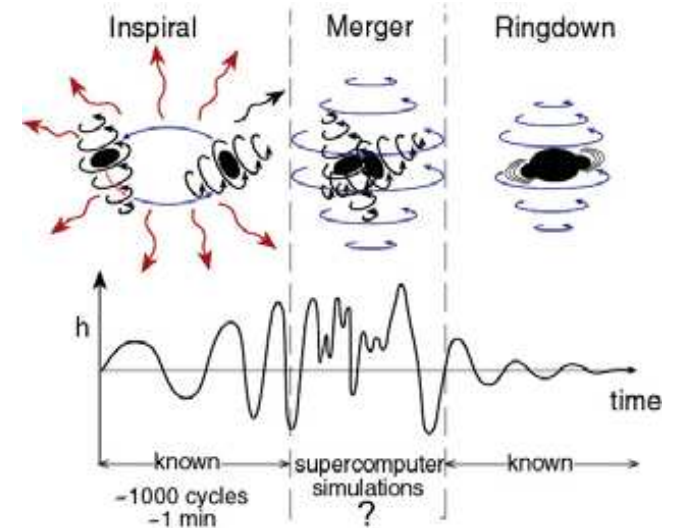


Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału CBC - Compact Binary Coalescence

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

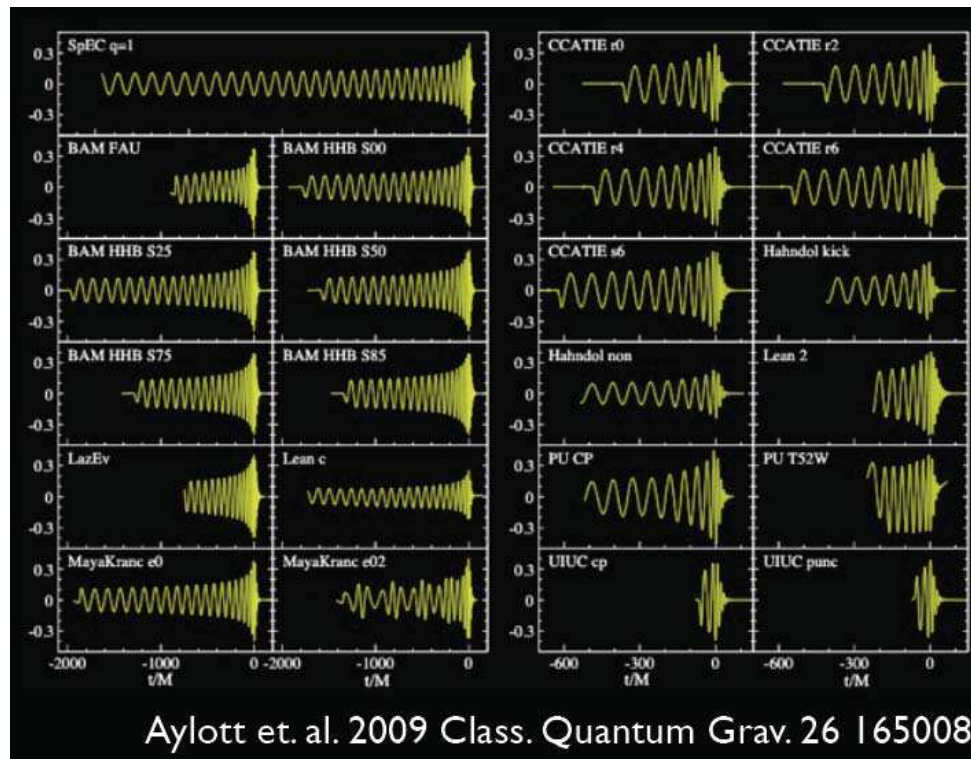
Możemy porównywać wzorzec z danymi



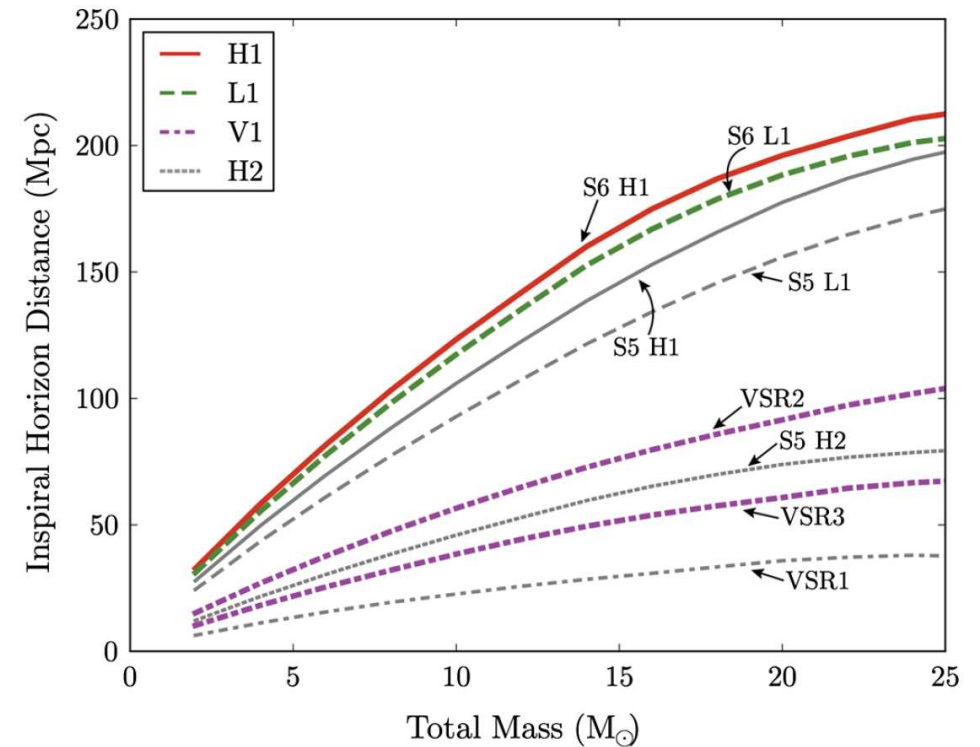
Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału

Przykładowy zestaw wzorców



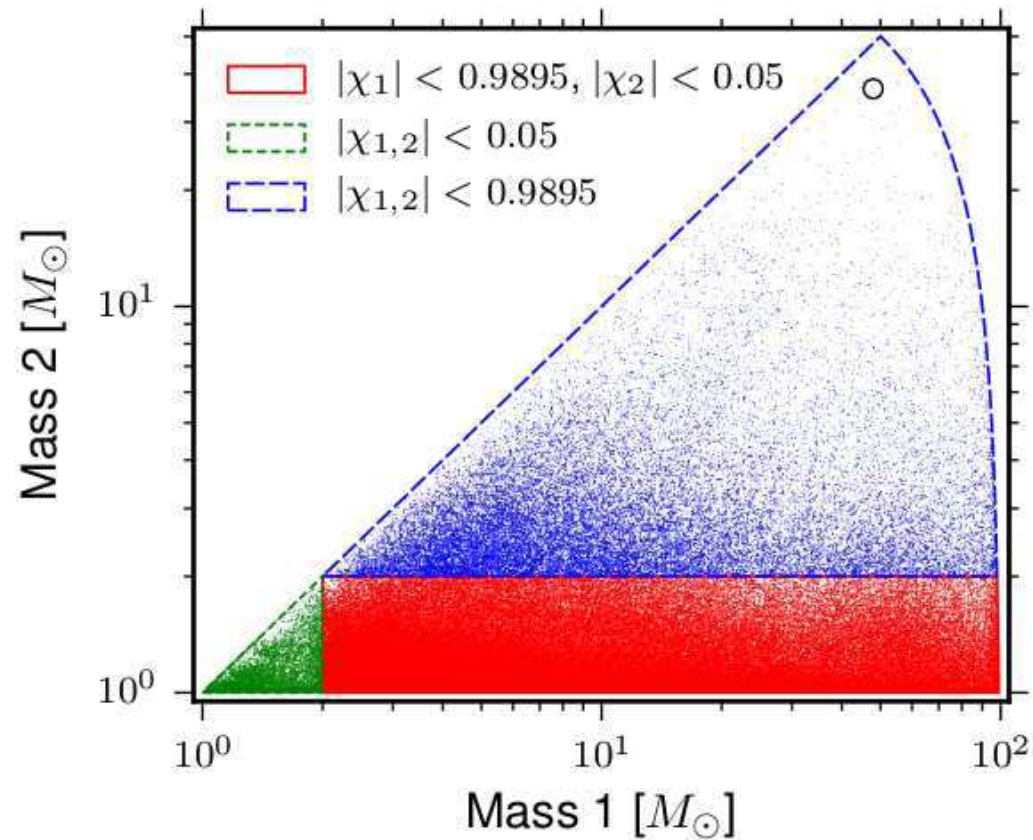
Szacowany zasięg przy detekcji zlewającego się układu podwójnego



Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału

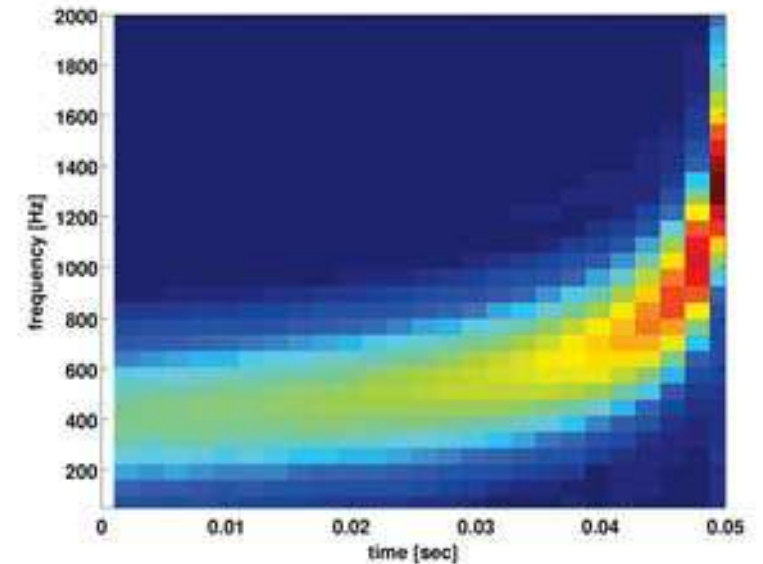
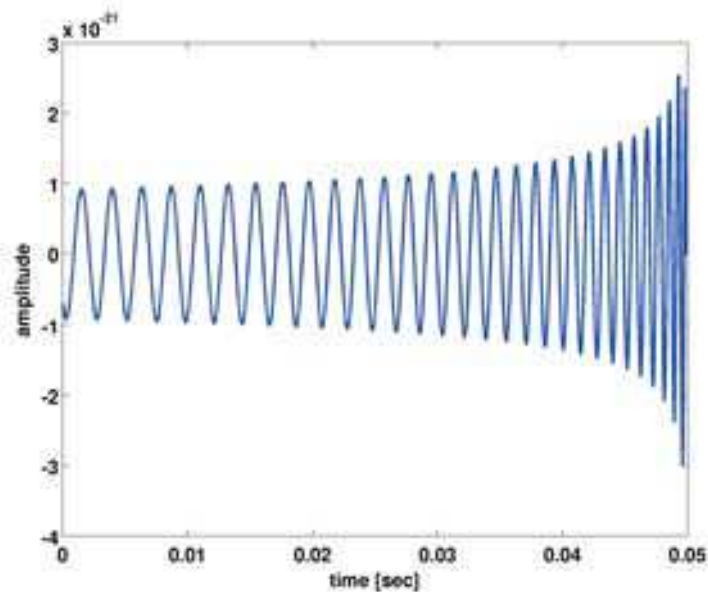
Rozważany zakres mas dla układu podwójnego gwiazd neutronowych/czarnych dziur



Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału

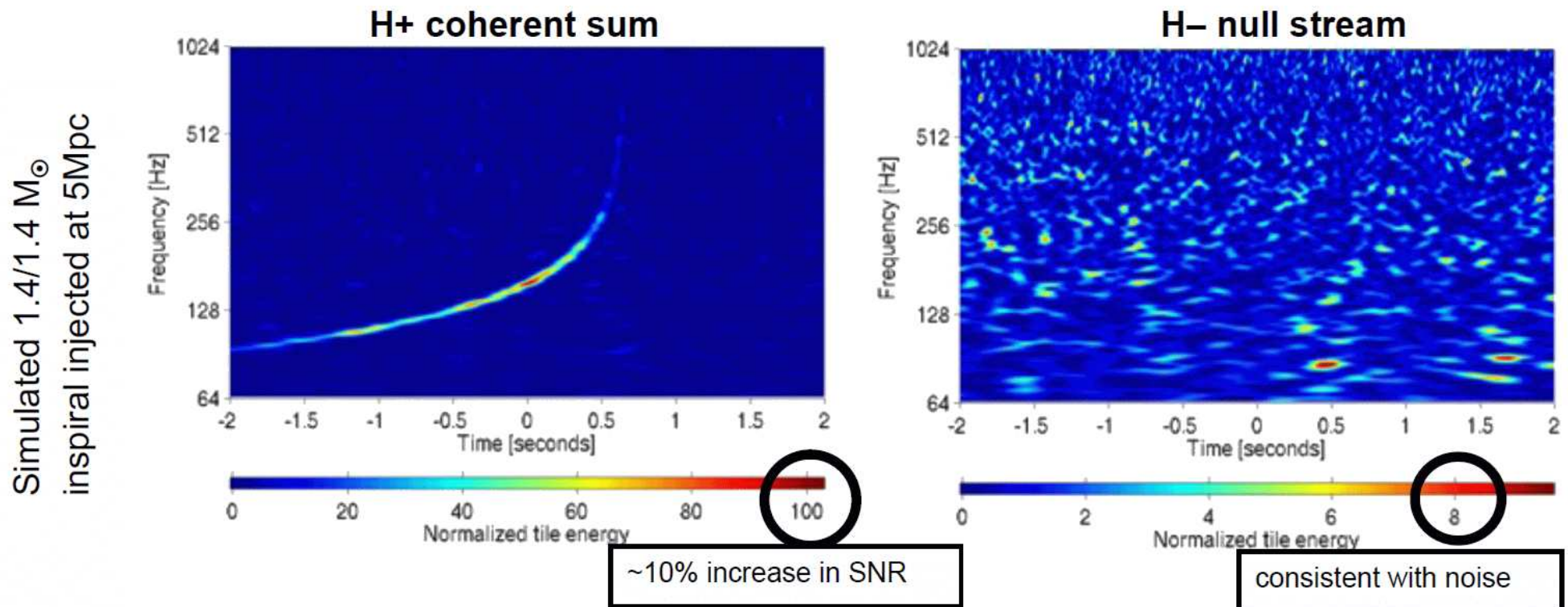
Alternatywne podejście: szukanie “rozbłysku” na mapie czas-częstość



Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału

Symulowany sygnał w detektorze LIGO

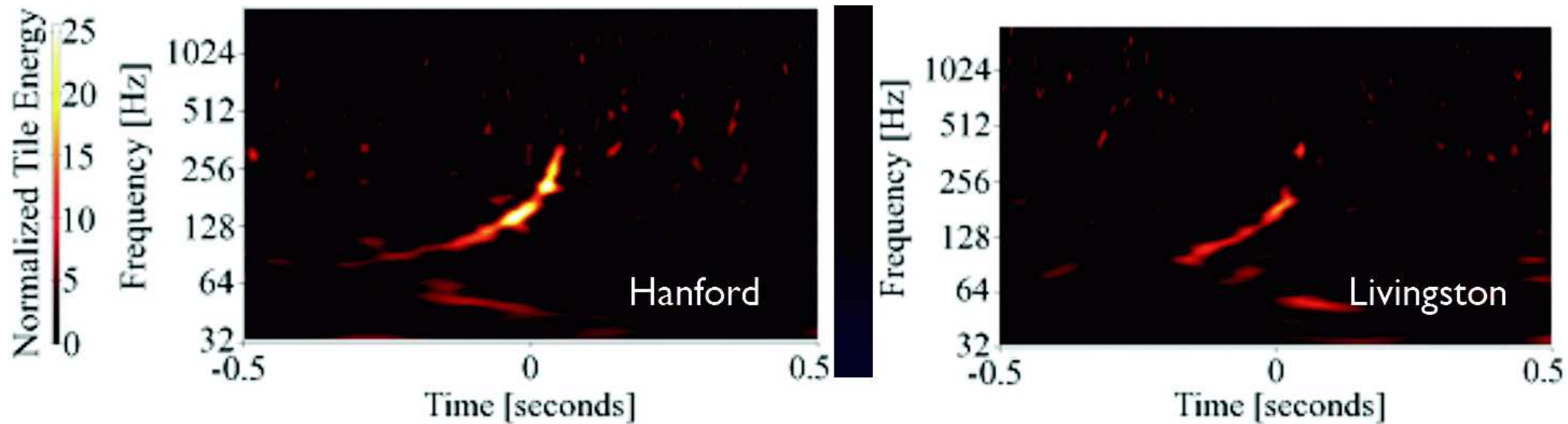


Aby lepiej odróżnić tło od szumów porównuje się sygnał z dwóch niezależnych detektorów. Sygnał wyraźniej widoczny w sumie (H+), nie widać go na różnicy (H-).

Detekcja fal grawitacyjnych

Analiza sygnału

W ostatnim okresie działalności LIGO (przed modernizacją) “potajemnie” wprowadzono do zbieranych danych symulowany sygnał w Wielkiej Niedźwiedzicy



Został poprawnie wykryty...

Detekcja fal grawitacyjnych

Advanced LIGO + VIRGO

Zakładany harmonogram uruchamiania zmodernizowanych detektorów:

Epoch			2015 – 2016	2016 – 2017	2017 – 2018	2019+	2022+ (India)
Estimated run duration			4 months	6 months	9 months	(per year)	(per year)
Burst range/Mpc	LIGO		40 – 60	60 – 75	75 – 90	105	105
	Virgo		—	20 – 40	40 – 50	40 – 80	80
BNS range/Mpc	LIGO		40 – 80	80 – 120	120 – 170	200	200
	Virgo		—	20 – 60	60 – 85	65 – 115	130
Estimated BNS detections			0.0005 – 4	0.006 – 20	0.04 – 100	0.2 – 200	0.4 – 400
90% CR	% within	5 deg ²	< 1	2	> 1 – 2	> 3 – 8	> 20
		20 deg ²	< 1	14	> 10	> 8 – 30	> 50
		median/deg ²	480	230	—	—	—
searched area	% within	5 deg ²	6	20	—	—	—
		20 deg ²	16	44	—	—	—
		median/deg ²	88	29	—	—	—

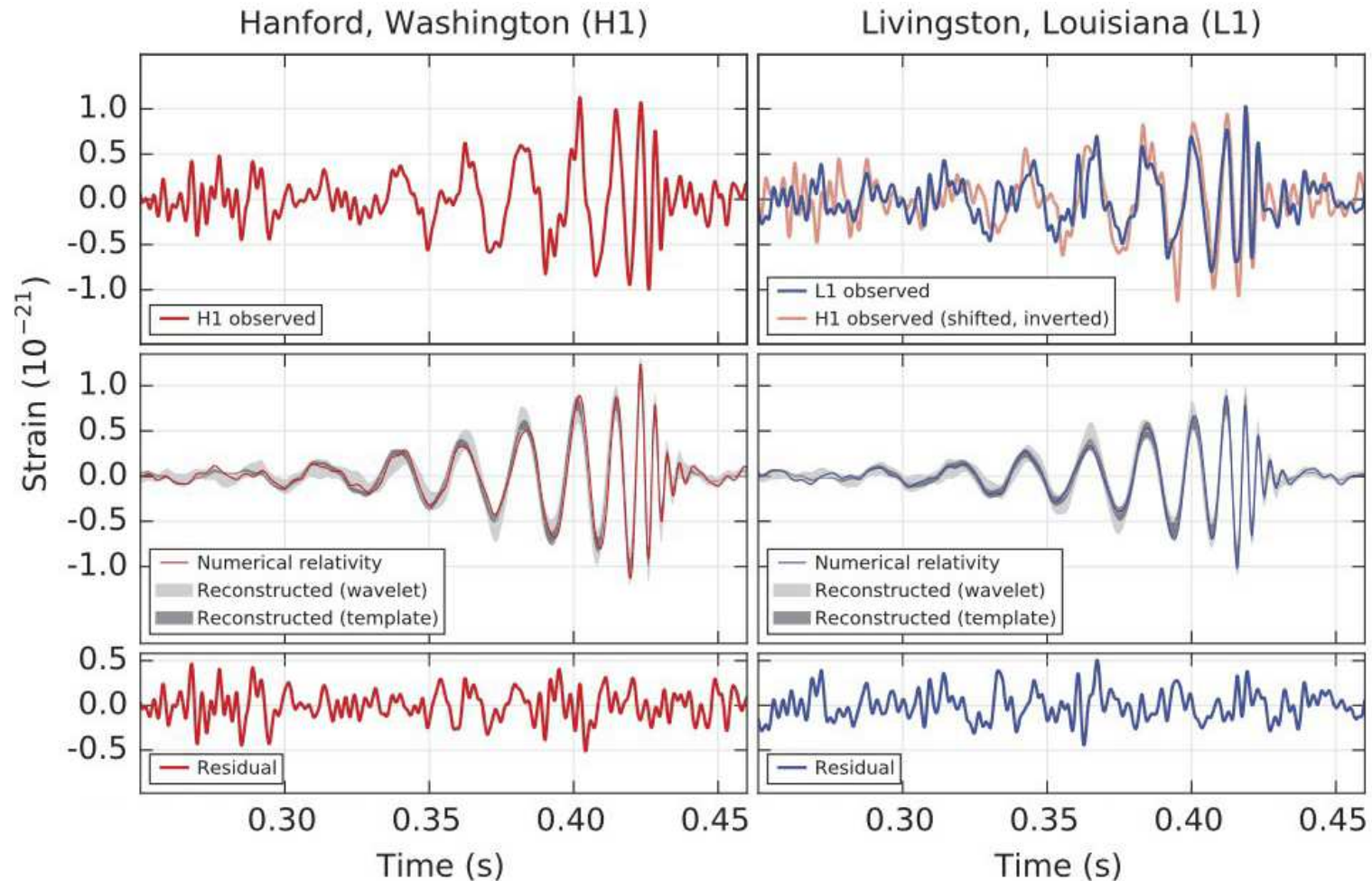
“Oficjalne” zbieranie danych miało rozpocząć się 18 września 2015.

Ale detektory pracowały już od pewnego czasu w ramach testów...

GW150914

Odkrycie

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



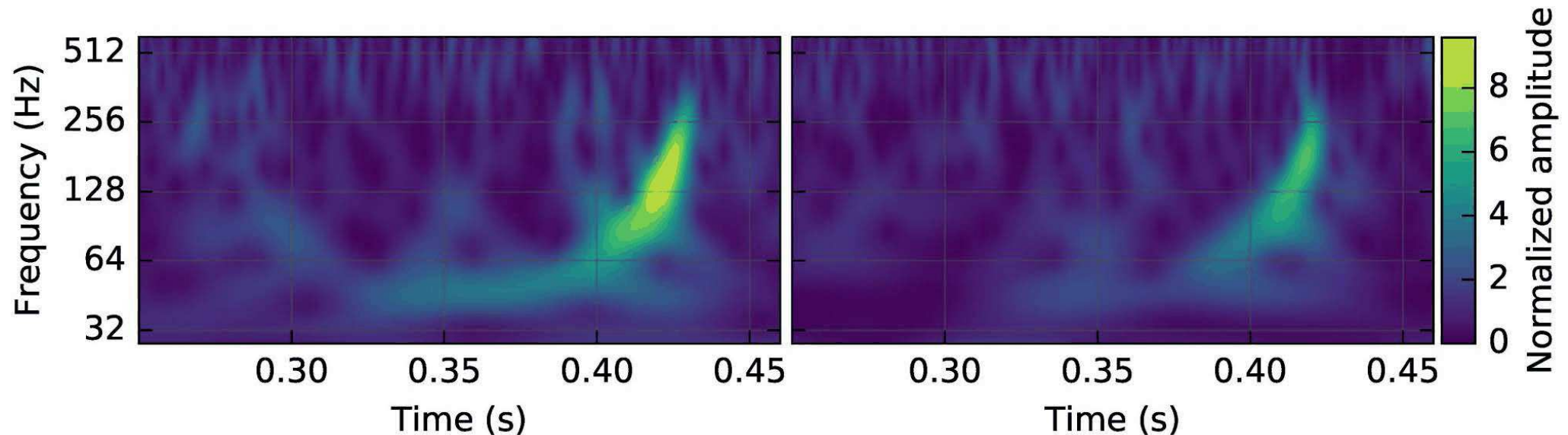
GW150914

Odkrycie

14 września 2015 o godz. 09:50:45 UTC

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

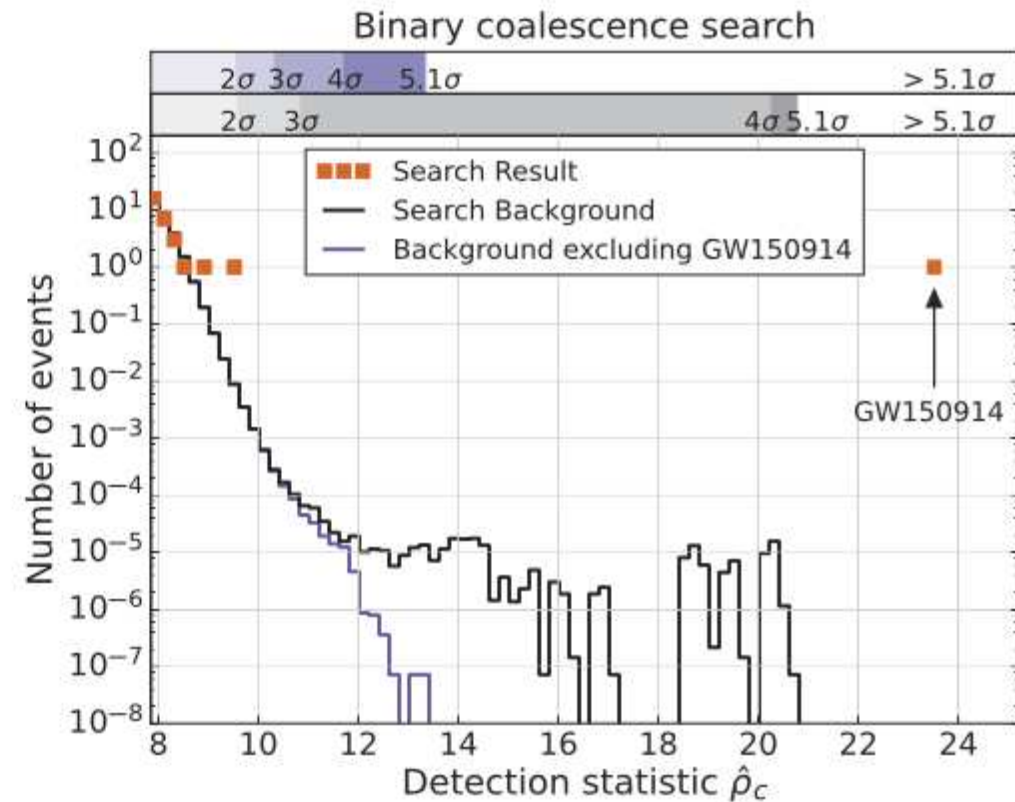
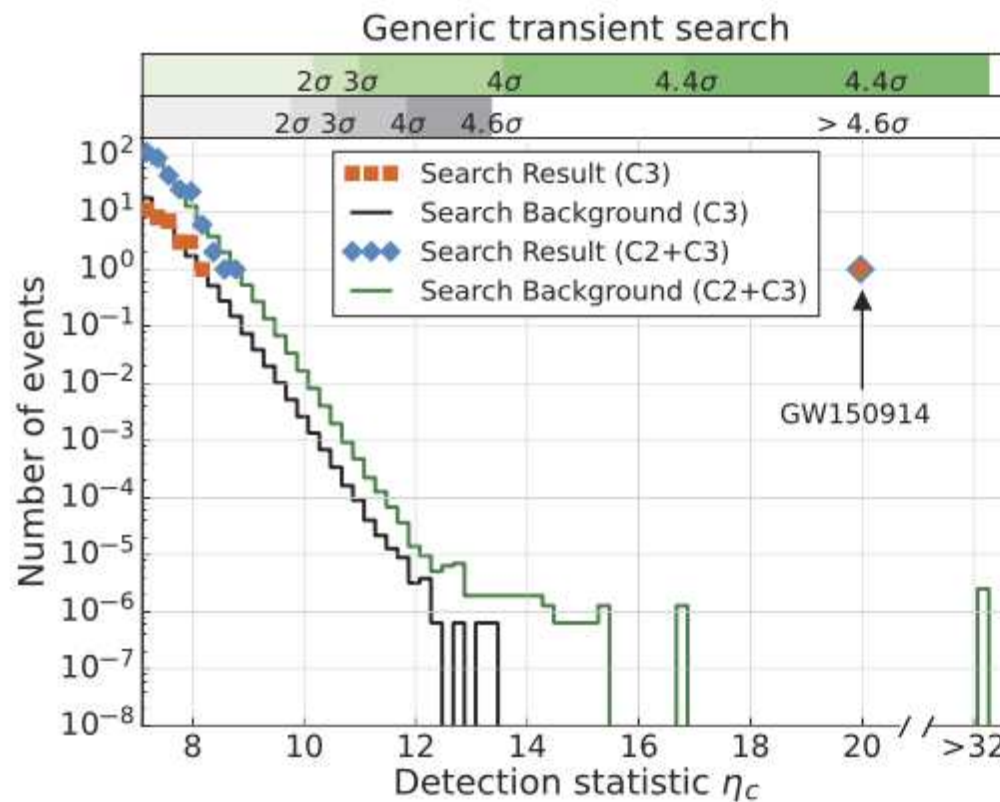
⇒ detekcja niezależna od przyjętego modelu



GW150914

Odkrycie

Ocena tła



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

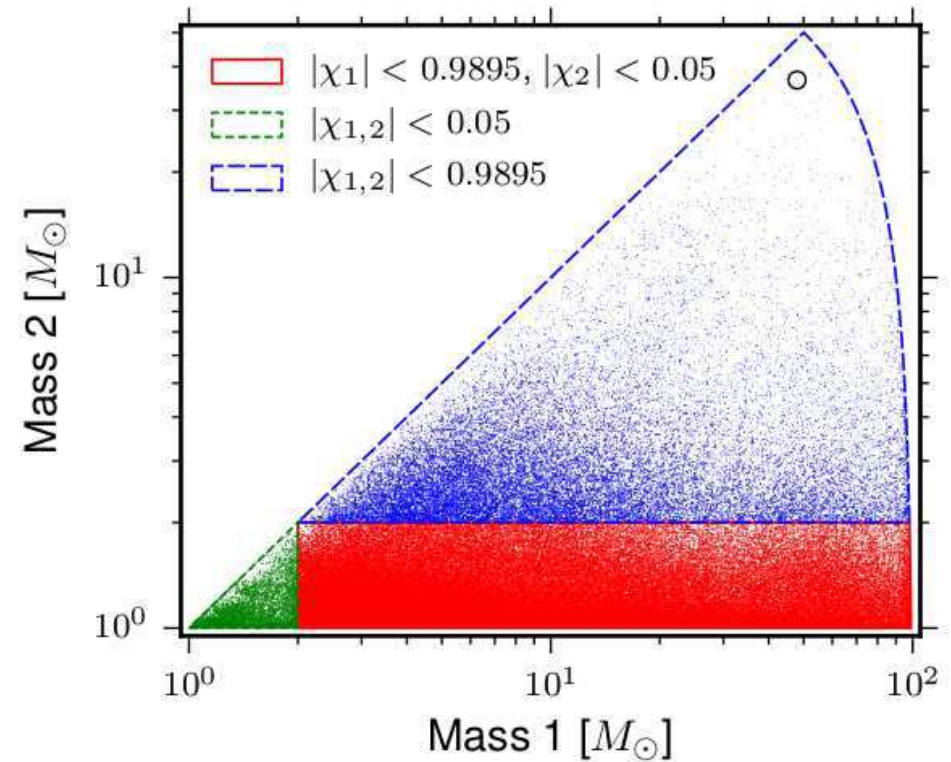
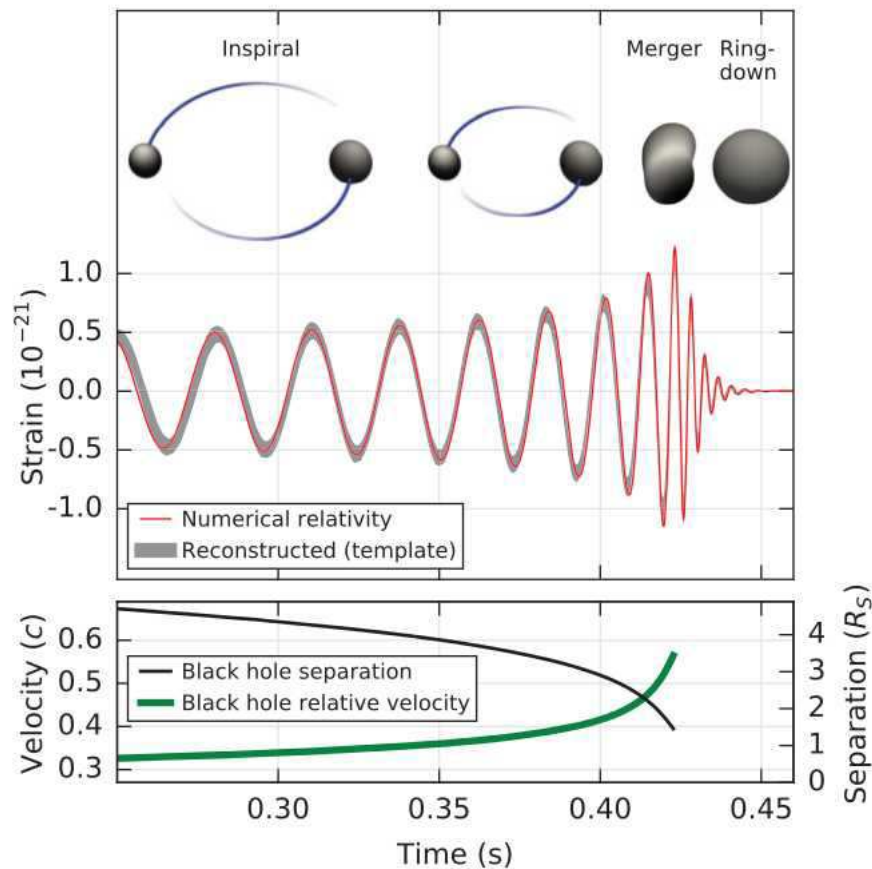
Poszukiwanie przypadków typu CBC: znaczoność na poziomie $> 5.1\sigma$

⇒ oczekiwane tło poniżej 1 przypadku na 203 000 lat

GW150914

Odkrycie

Dopasowany wzorzec w samym rogu rozważanego zakresu mas (!)



⇒ zlanie się dwóch czarnych dziur

Czarne dziury

Własności zależą nie tylko od **masy**, ale także **momentu pędu** (spinu) i **ładunku**

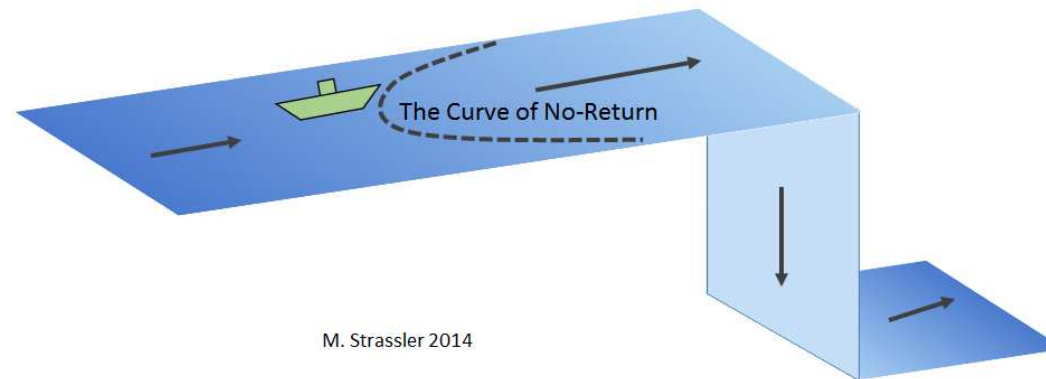
W przypadku zderzających się czarnych dziur mamy dodatkowo **orbitalny moment pędu**

Dla przebiegu zlewania znaczenie mają nie tylko wartości ale i **orientacje** spinów i momentu orbitalnego

Parametrami modelu są też własności powstającej czarnej dziury

⇒ w sumie dopasować trzeba kilkanaście parametrów (!)

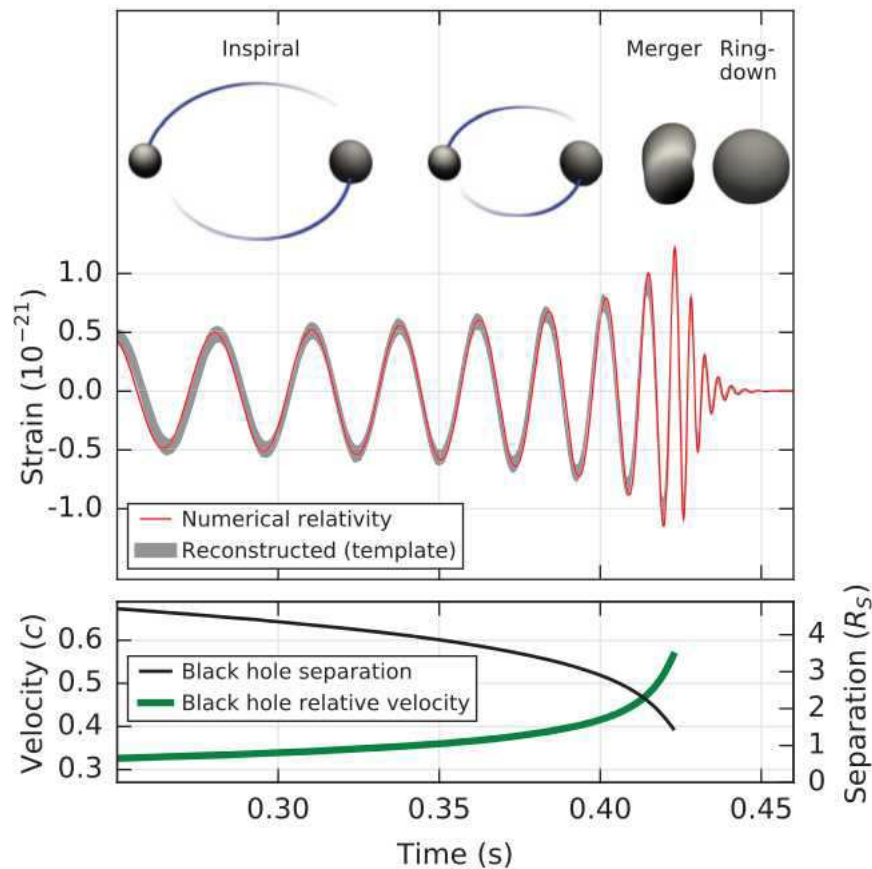
A Person In a Boat that Crosses the Curve of No-Return Will Notice Nothing at the Time, But is Doomed To Go Over The Waterfall



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:

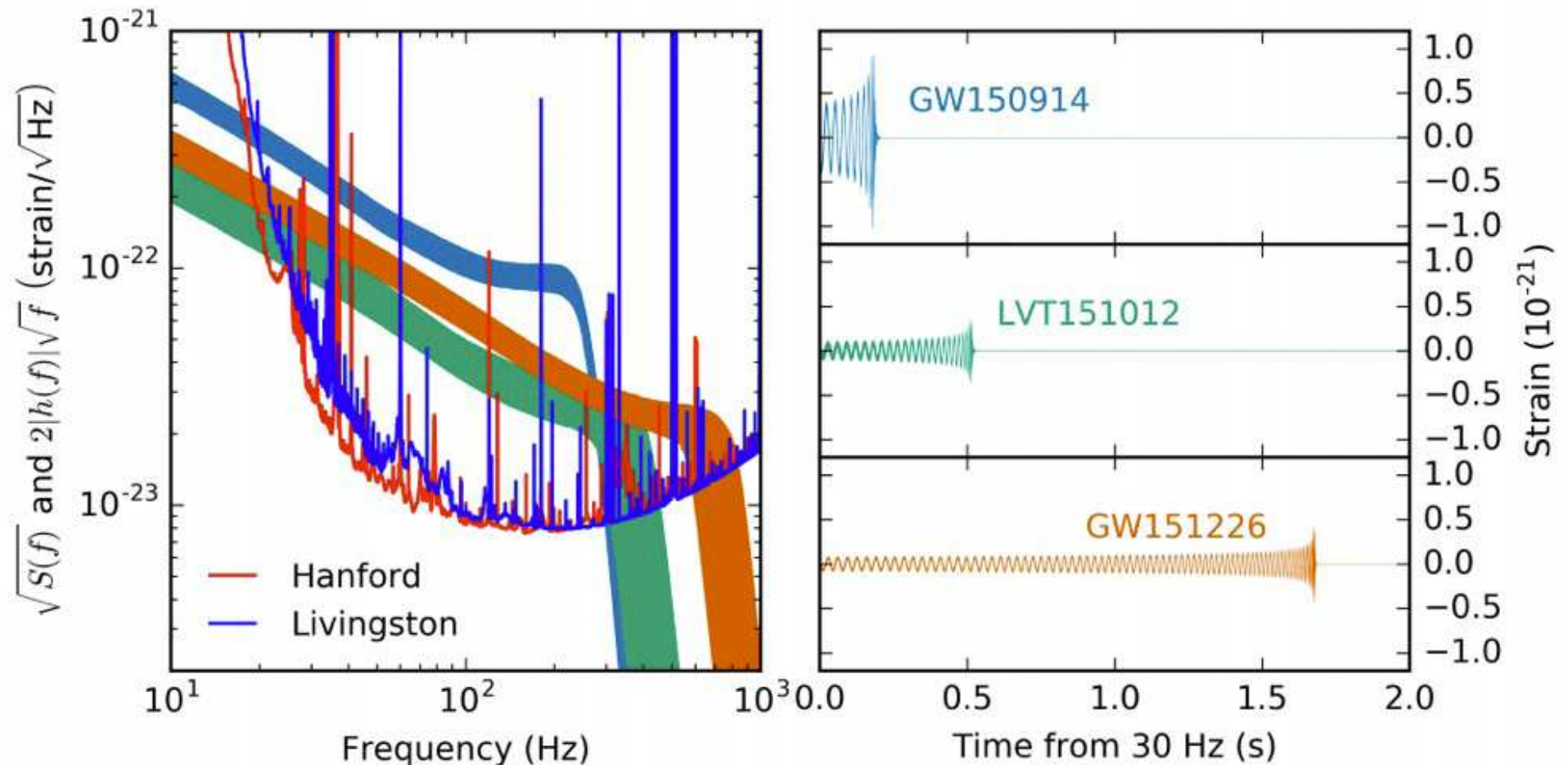
$$d = 410_{-180}^{+160} Mpc$$

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

Kolejne detekcje

Wyniki LIGO 2015

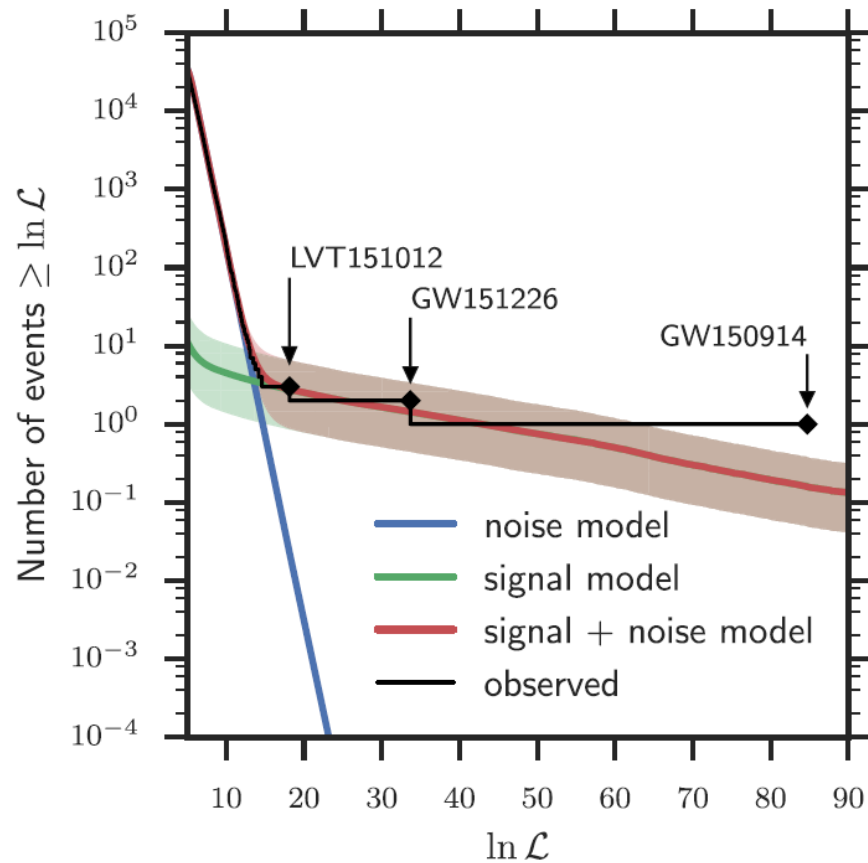
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w roku 2015: jeden “pewny” (GW151226) i jeden “kandydat” (LVT151012)



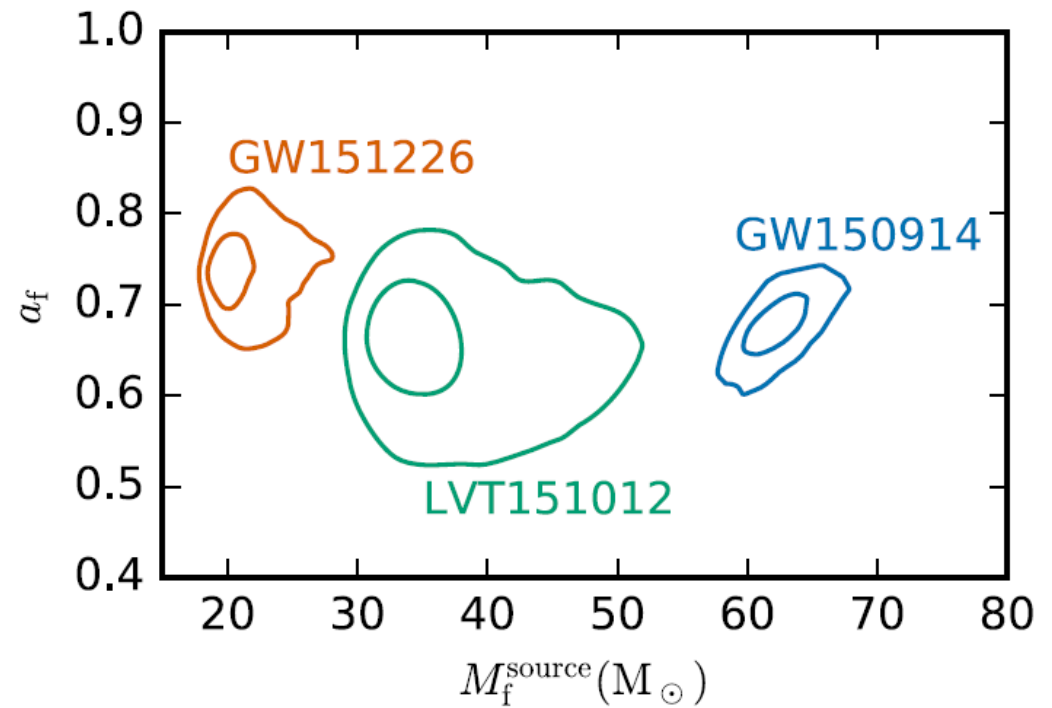
Kolejne detekcje

Wyniki LIGO 2015

Oczekiwane tło



Masa i spin końcowej czarnej dziury



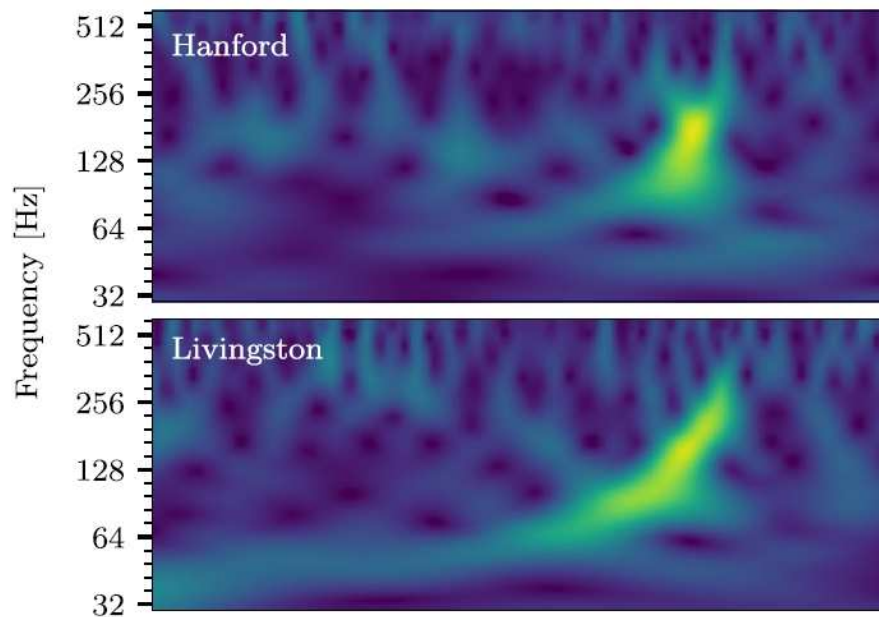
Kolejne detekcje

Przypadek 2017

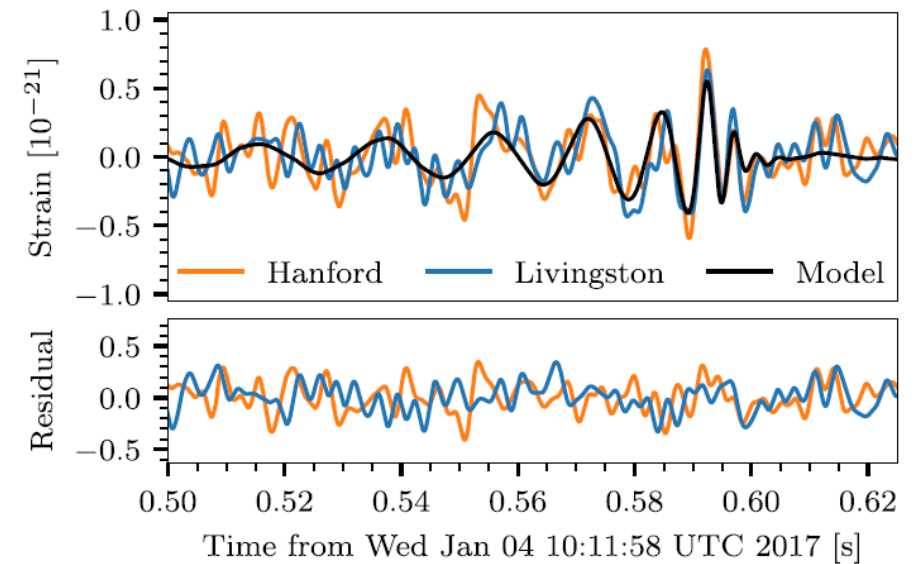
Zaprezentowany 1 czerwca 2017

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

Widmo częstości



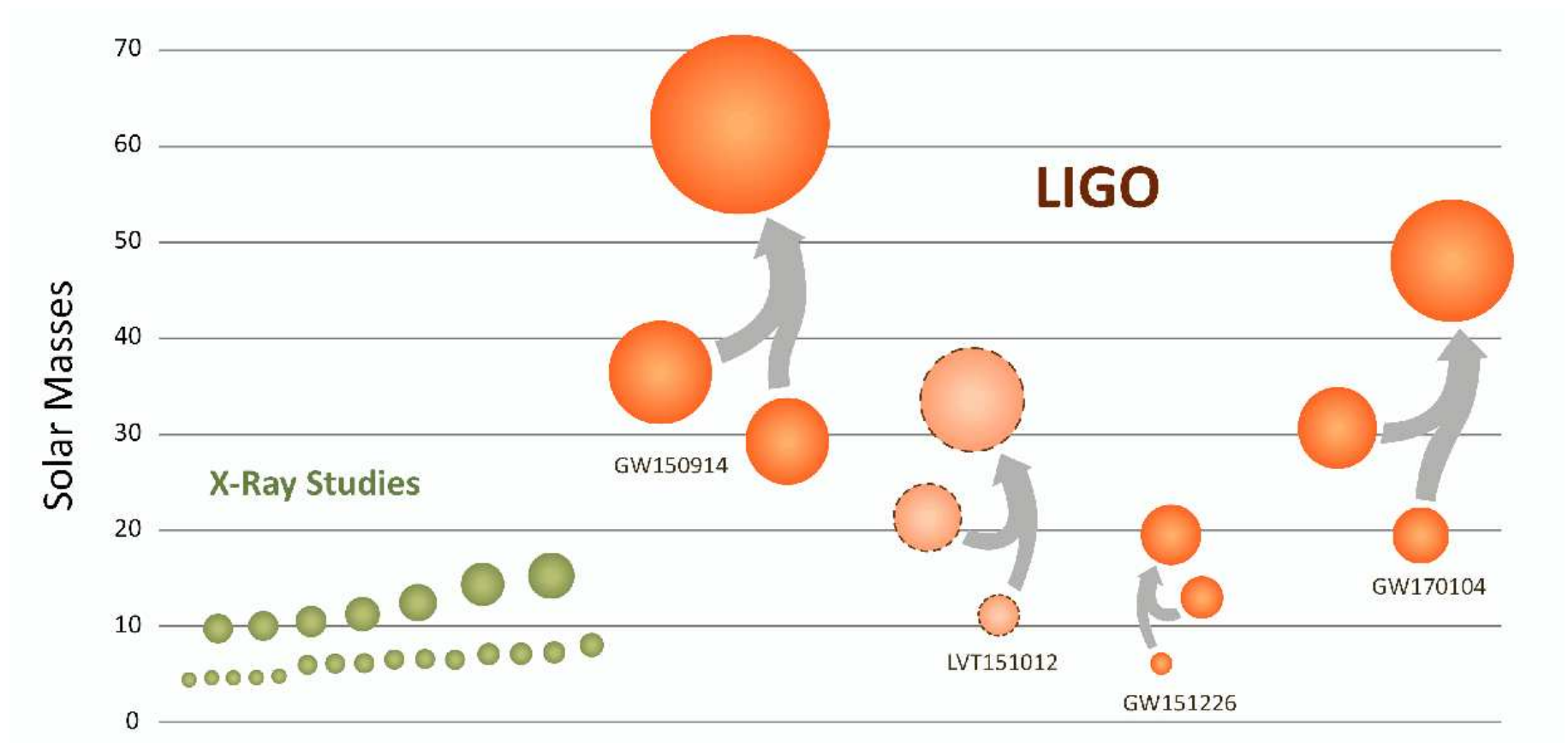
Dopasowanie wzorca



Kolejne detekcje

Widmo mas czarnych dziur

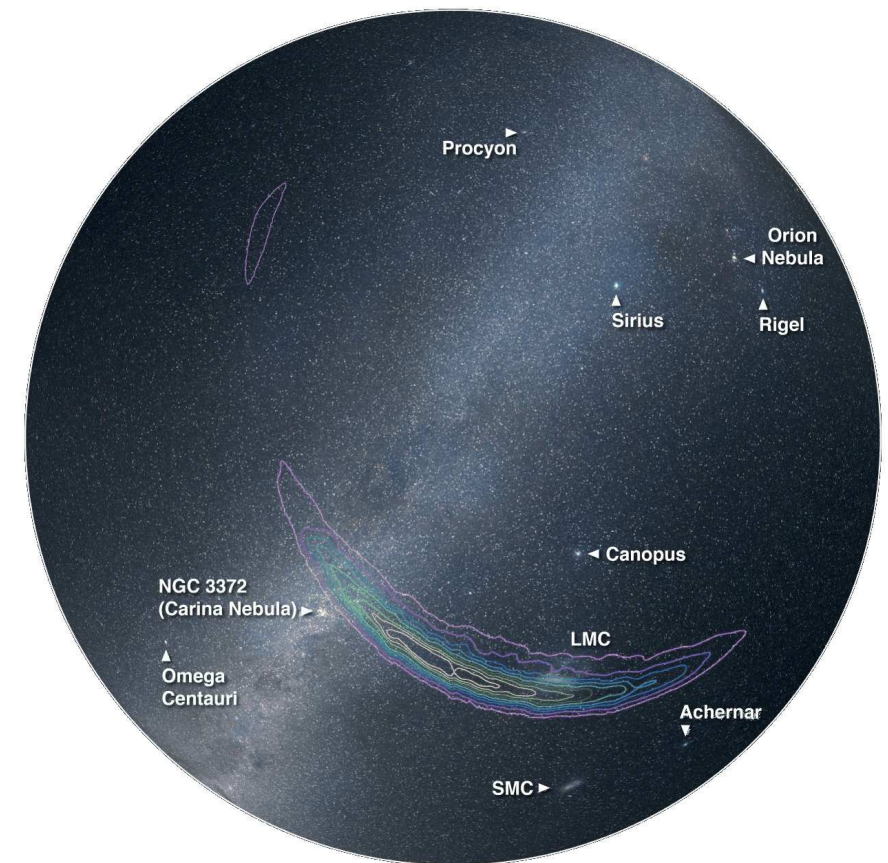
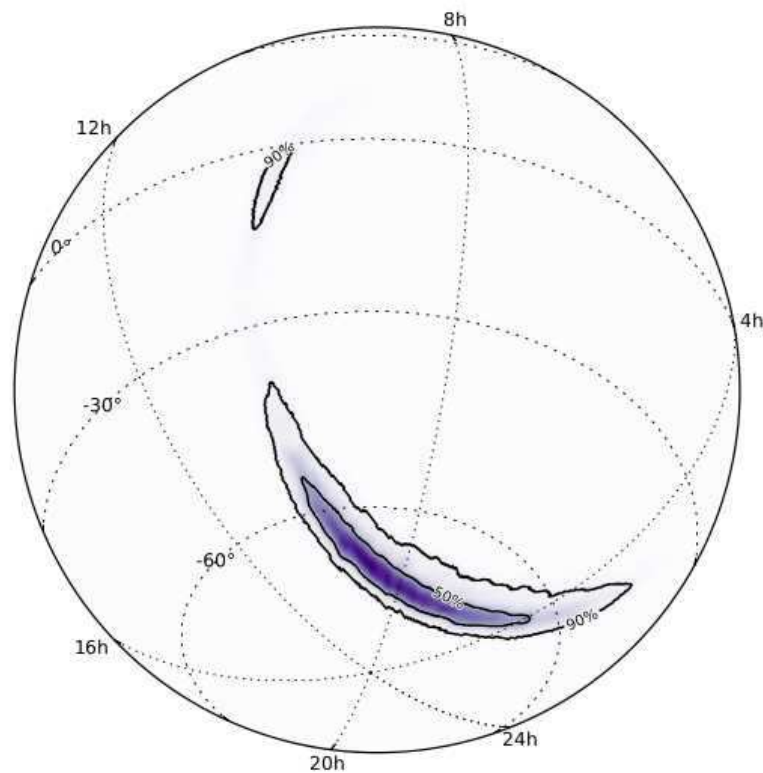
Rekonstruowane przez LIGO masy czarnych dziur są znacznie większe niż się spodziewaliśmy. Może nas to zmusić do zmiany naszych modeli...



GW150914

Położenie

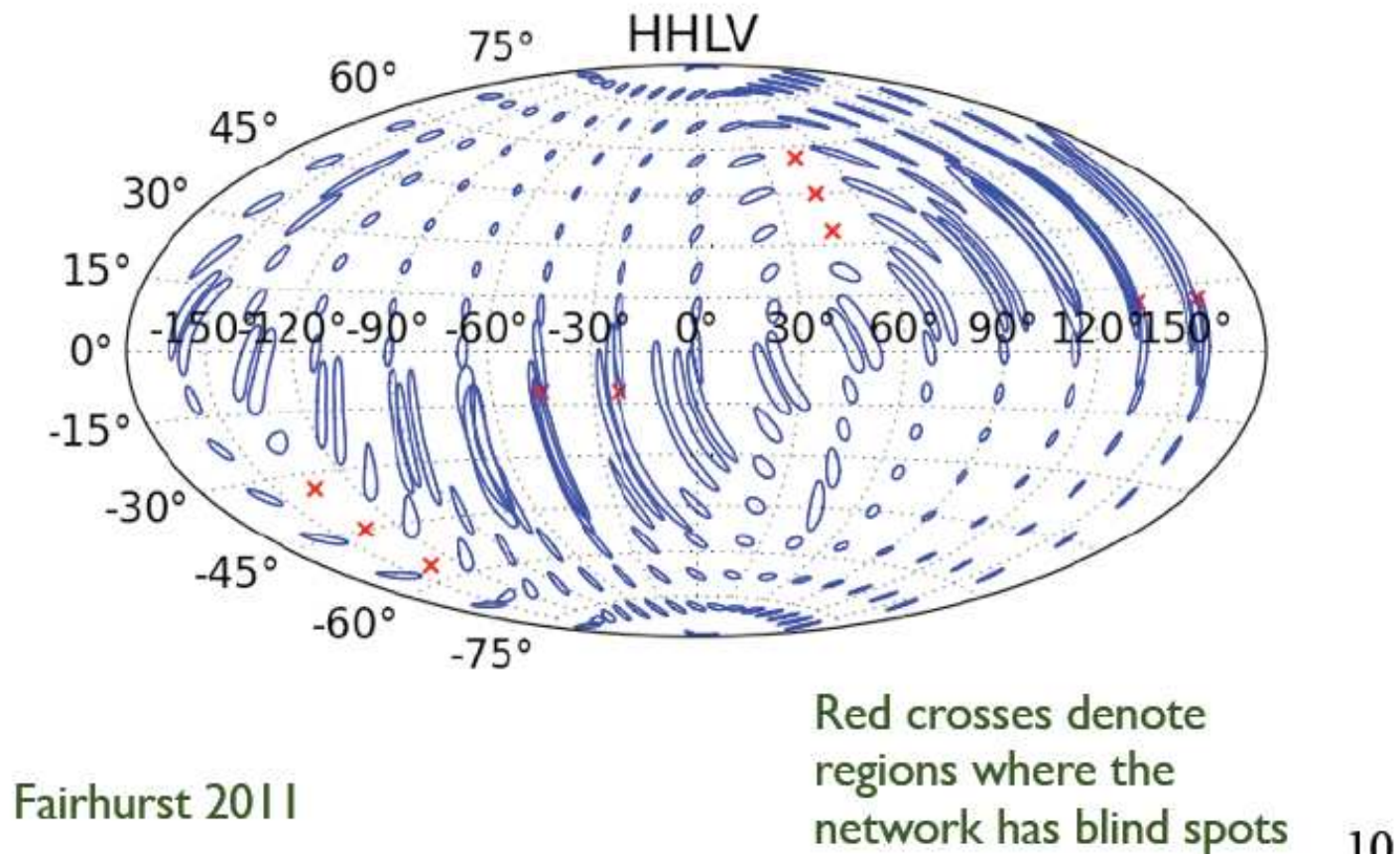
Niestety, w oparciu o pomiar w dwóch interferometrach nie jest możliwe jednoznaczne określenie pozycji. Nie zidentyfikowano potencjalnego źródła...



Detekcja fal grawitacyjnych

Położenie

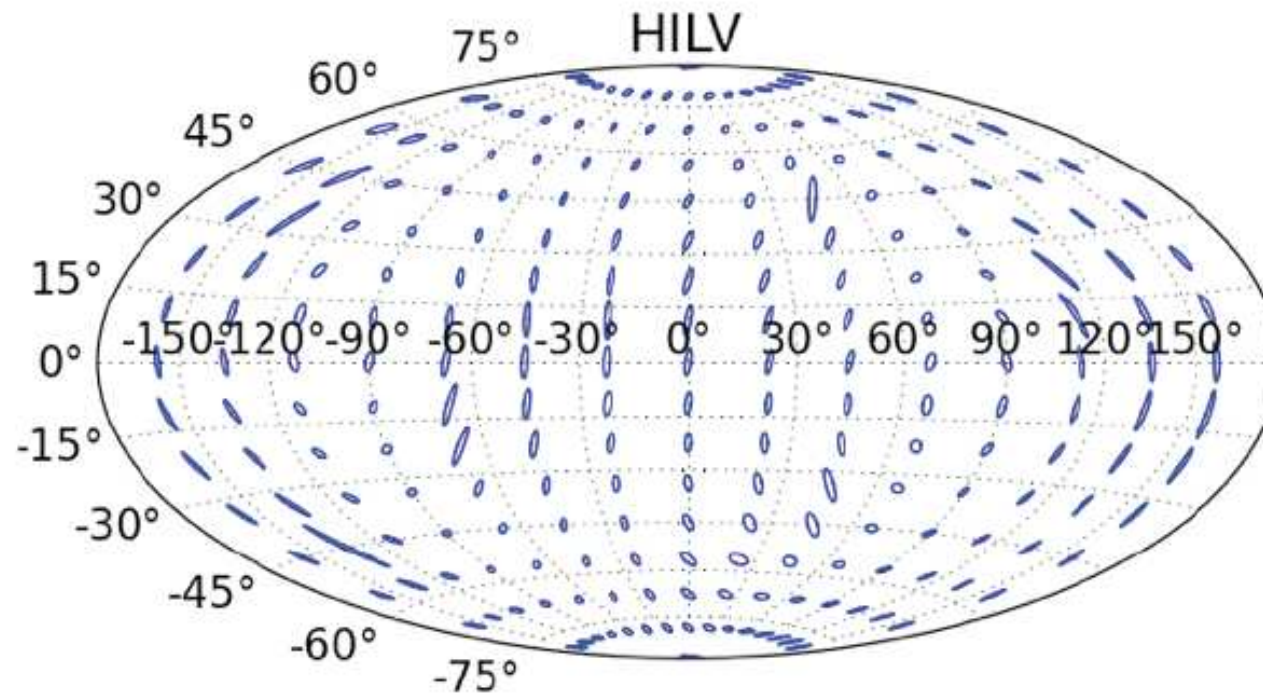
Znacznie dokładniejsze wyznaczanie pozycji będzie możliwe po uruchomieniu detektora VIRGO. (pierwotnie planowane we wrześniu 2016, ale problemy techniczne)



Detekcja fal grawitacyjnych

Położenie

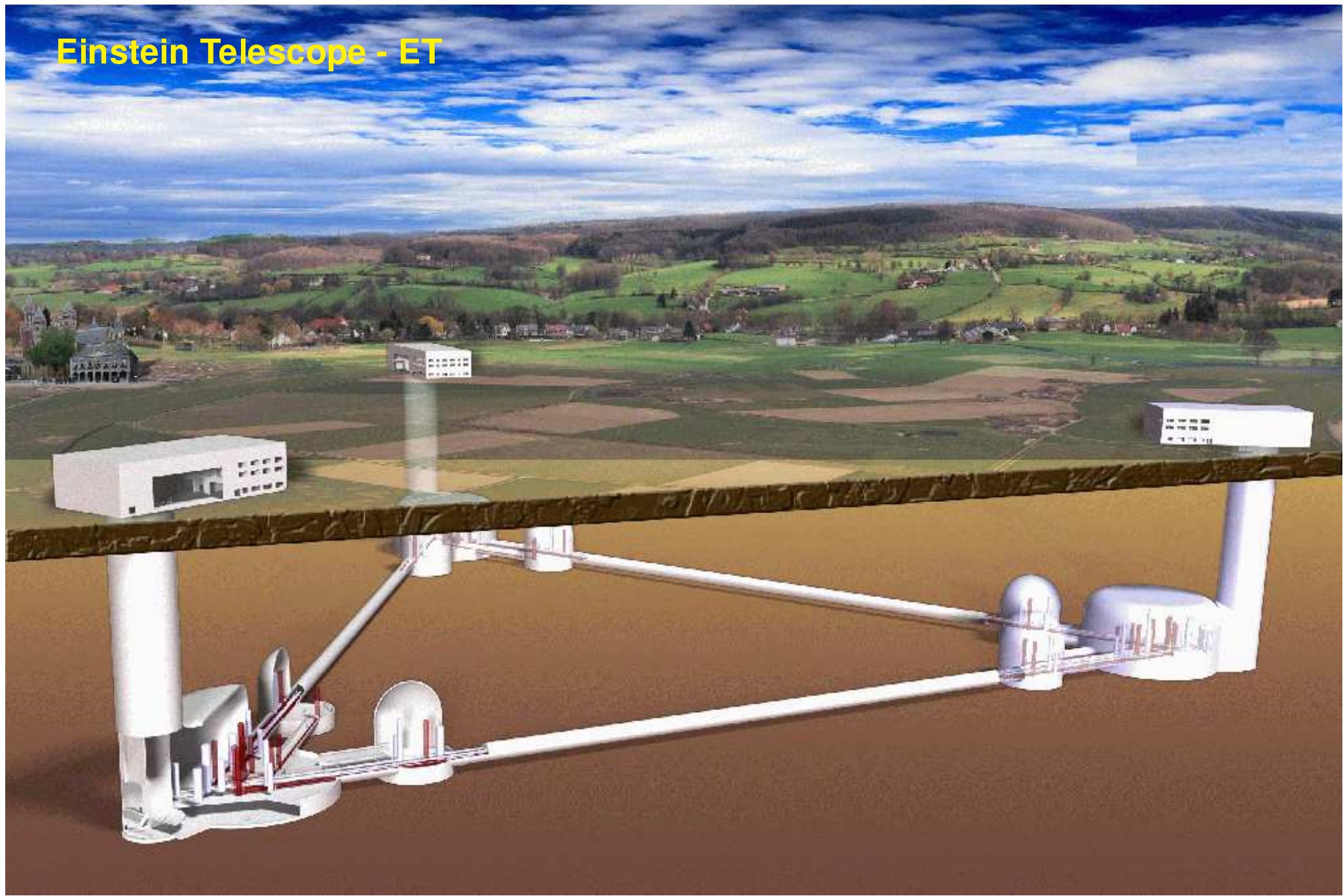
Znacznie dokładniejsze wyznaczanie pozycji będzie możliwe po uruchomieniu detektora VIRGO. W lutym 2016 zatwierdzono budowę LIGO-India



Fairhurst 2011

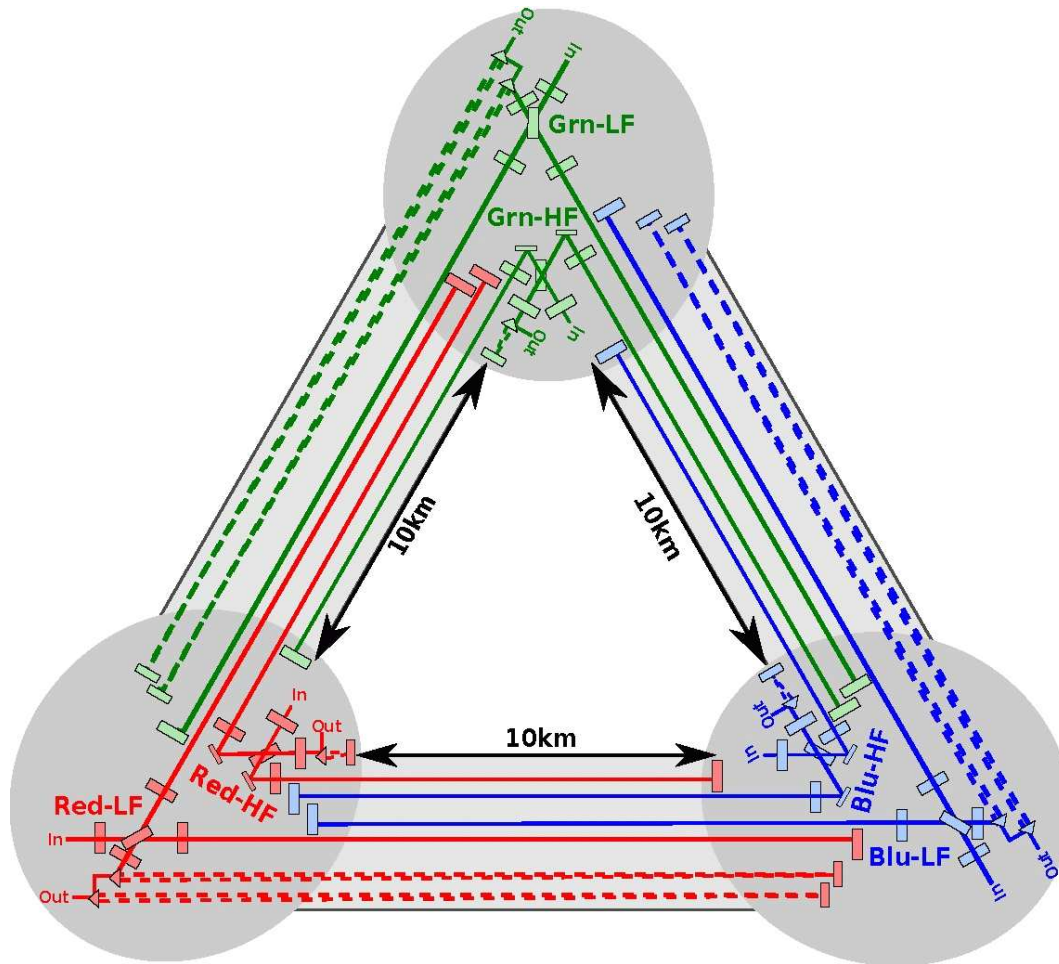
⇒ astronomia fal grawitacyjnych

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.

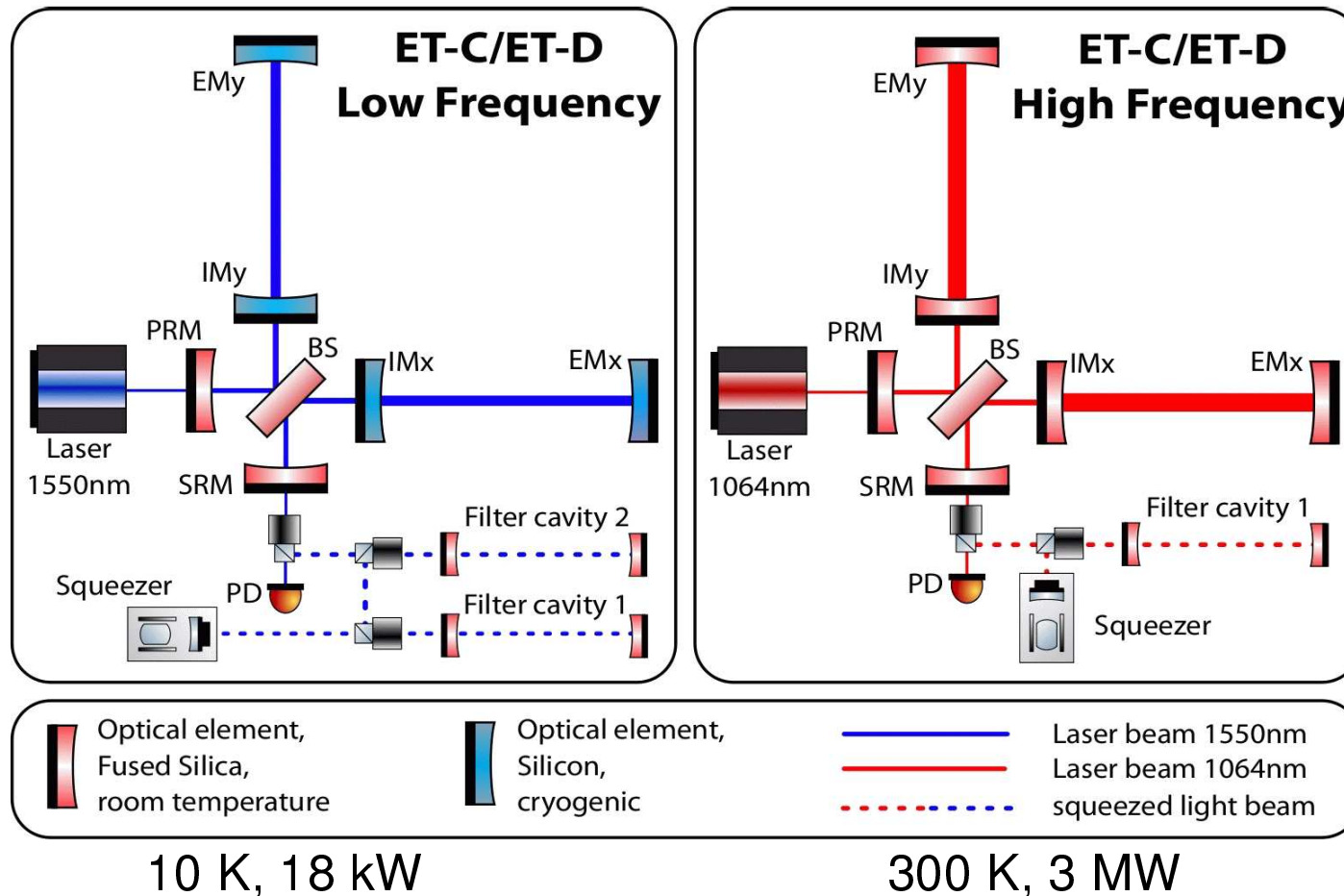
Decyzja o finansowaniu powinna zapaść w ciągu kilku najbliższych lat.

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

Przyszłe eksperymenty

Einstein Telescope

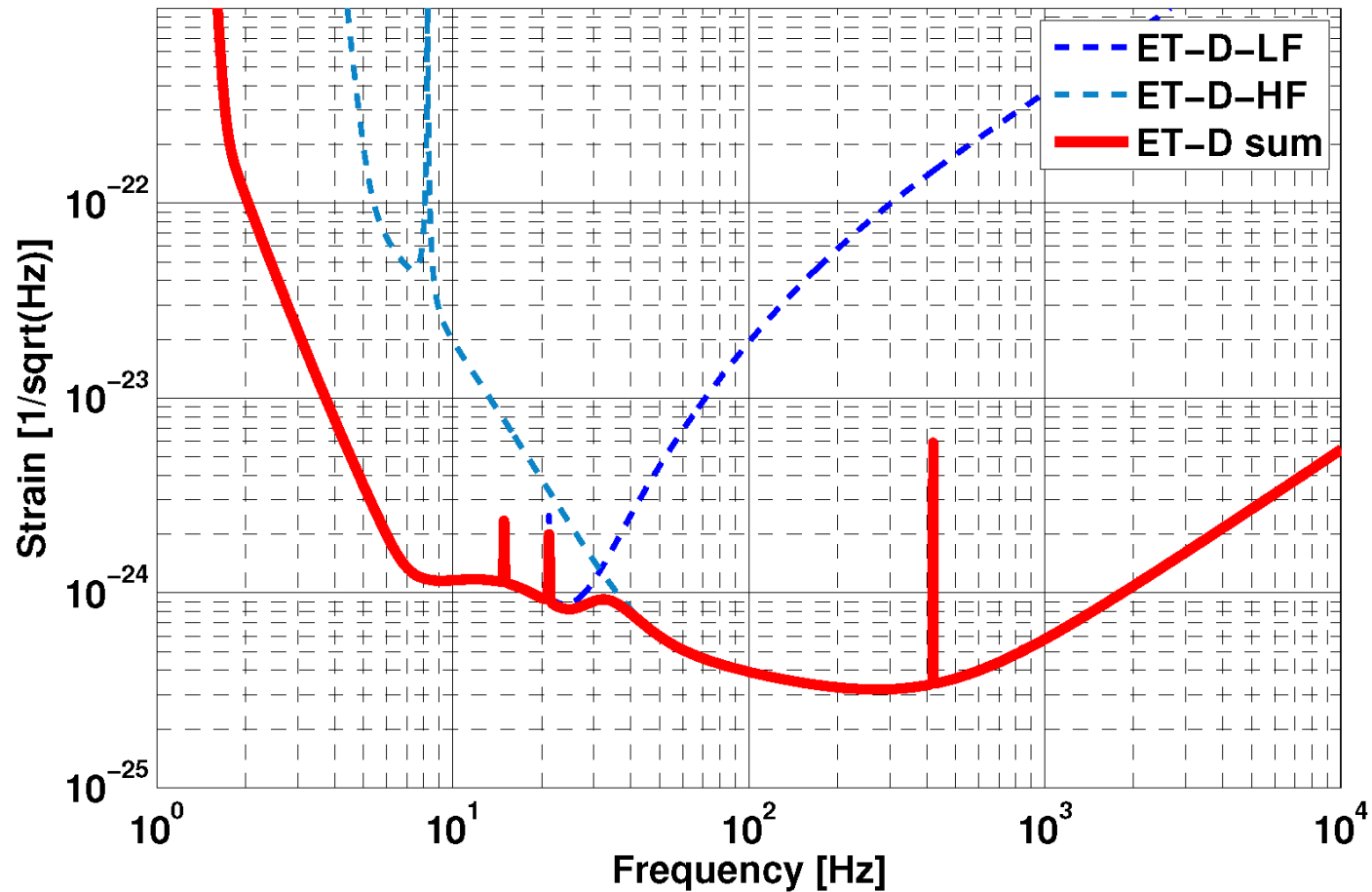
Aby zwiększyć czułość urządzenia zakłada się budowę w każdym wierzchołku dwóch niezależnych interferometrów:



Przyszłe eksperymenty

Einstein Telescope

Oczekiwana czułość całego urządzenia:

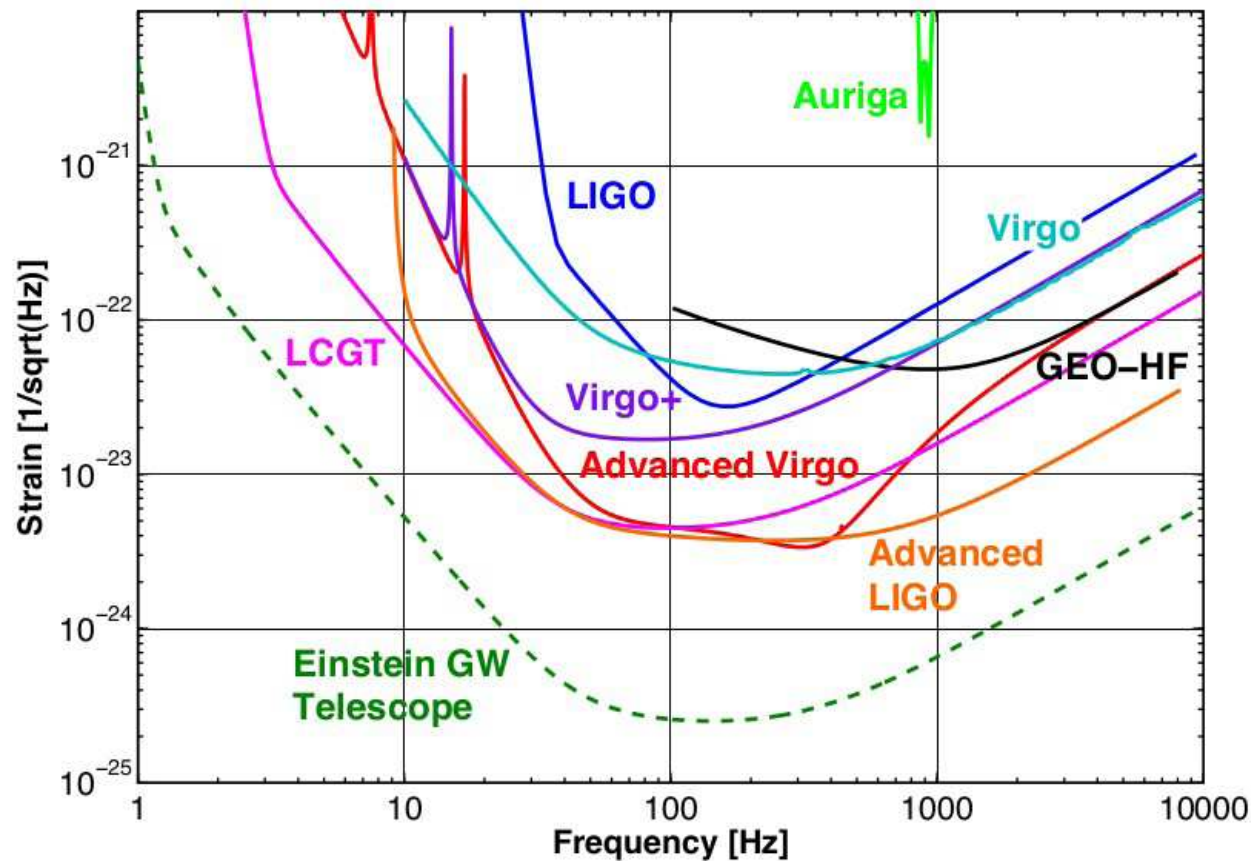


Przyszłe eksperymenty

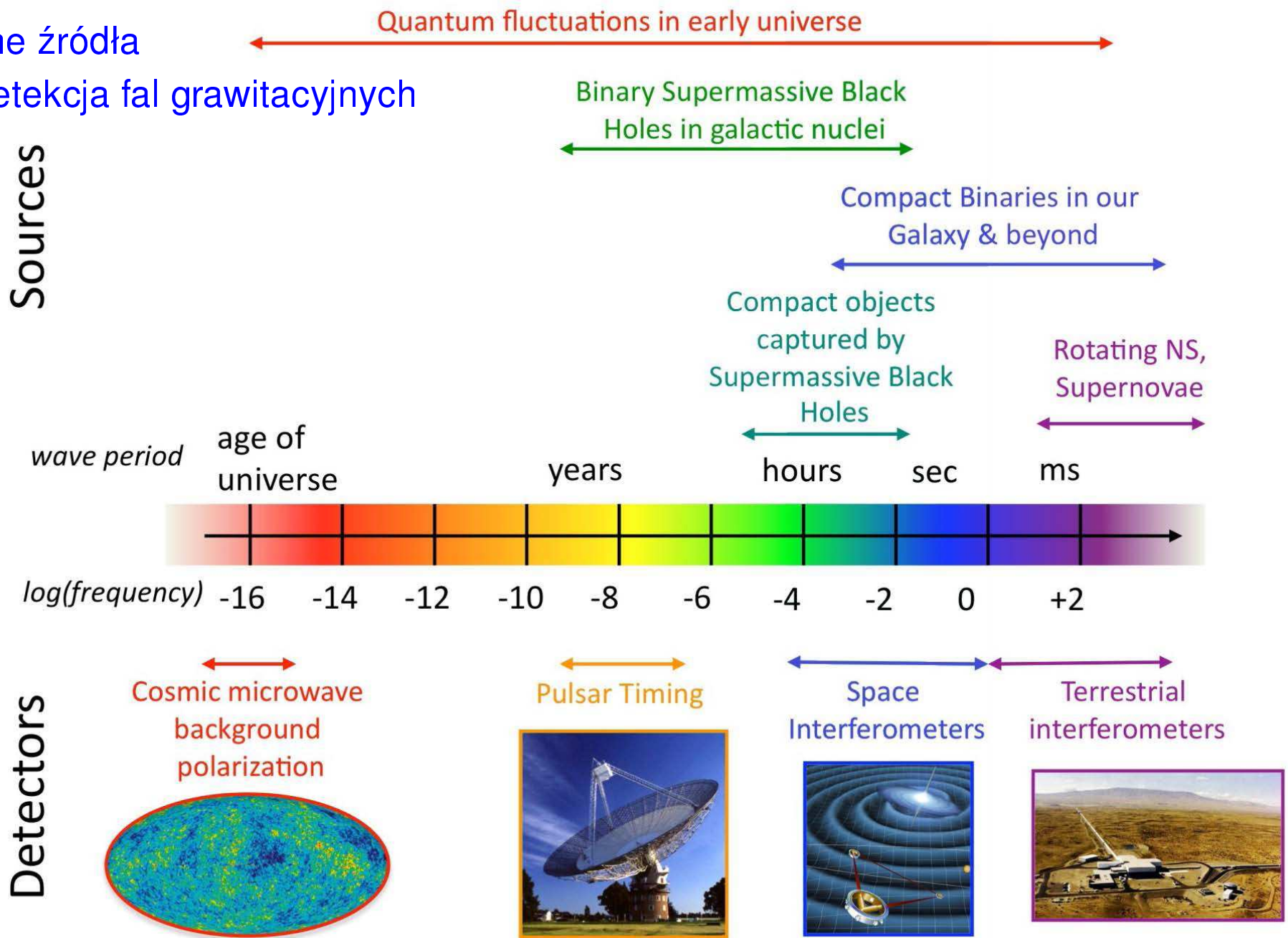
Einstein Telescope

Czułość o rząd wielkości większa niż Advanced LIGO + Virgo

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



Potencjalne źródła widmo i detekcja fal grawitacyjnych

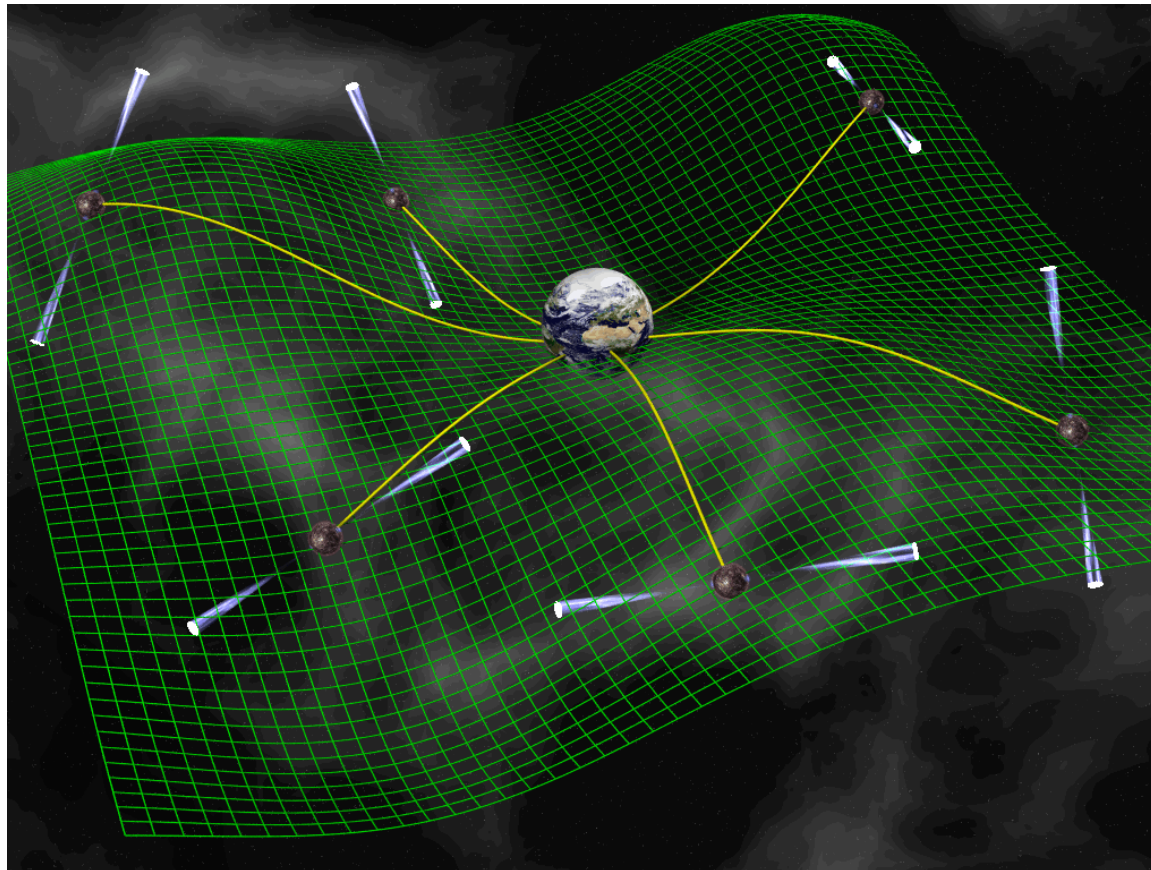


Detekcja fal grawitacyjnych

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

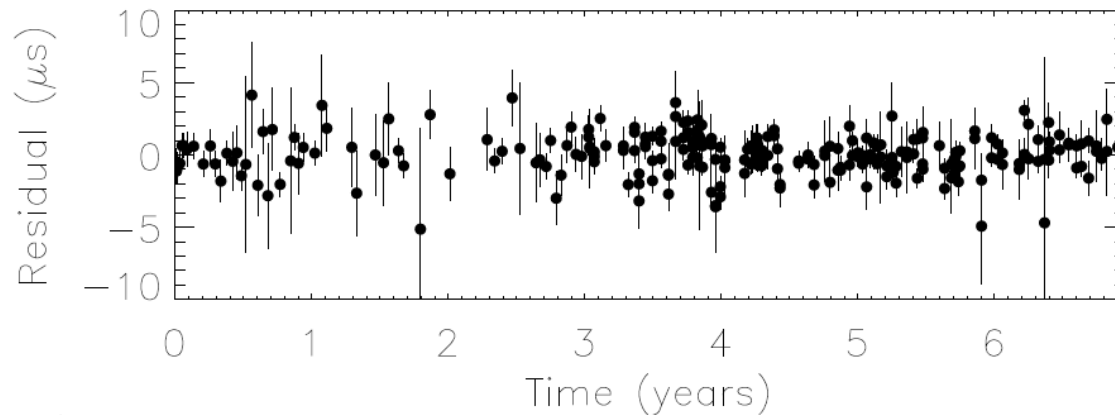
Obserwacja odległych pulsarów

International Pulsar Timing Array - monitorowanie wybranych pulsarów

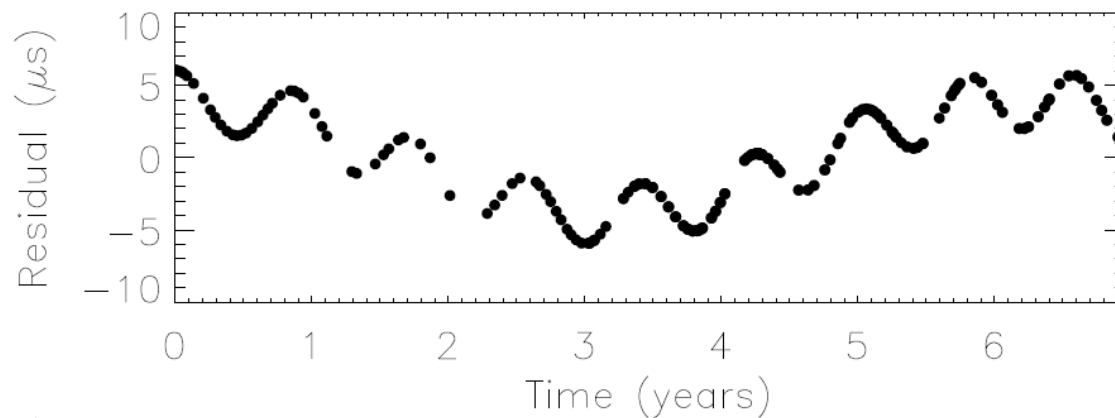


Detekcja fal grawitacyjnych

Obserwacja odległych pulsarów



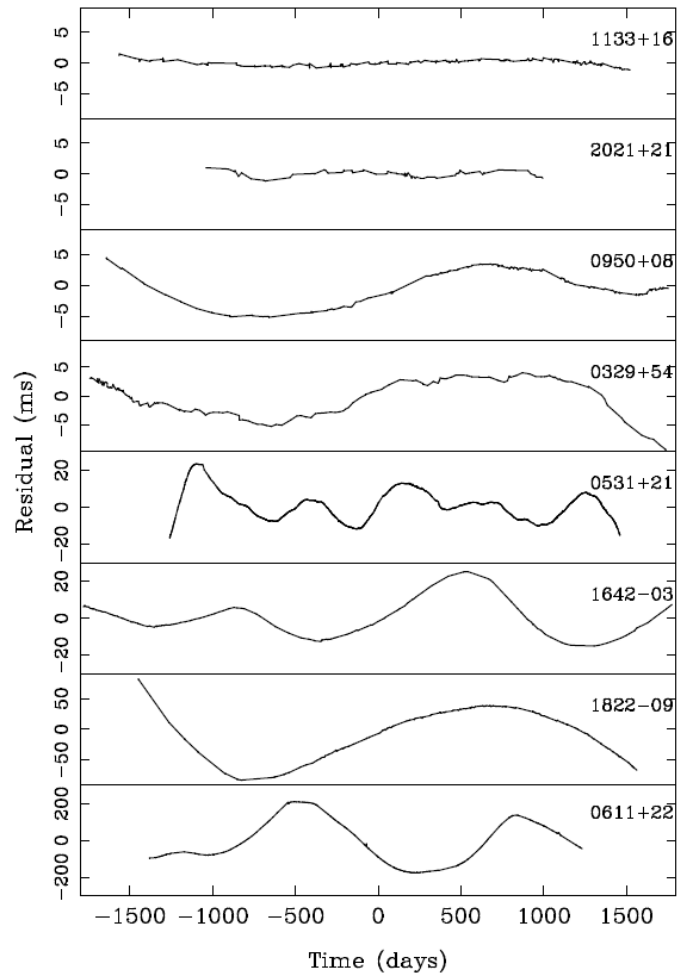
Obserwowane odchylenia okresu pulsara PSR B1855+09



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

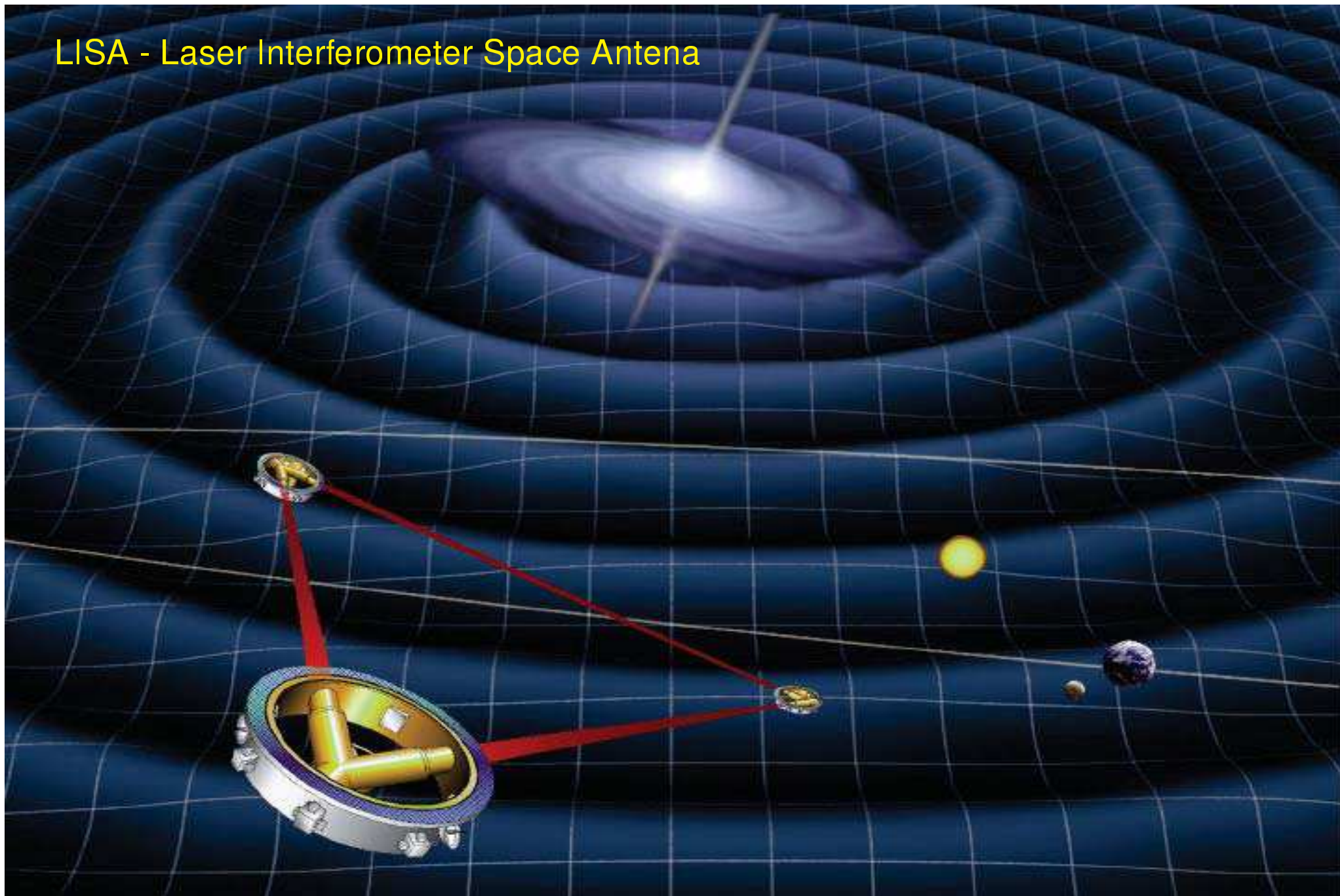
Projekt NASA+ESA rozwijany od lat 1990.

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

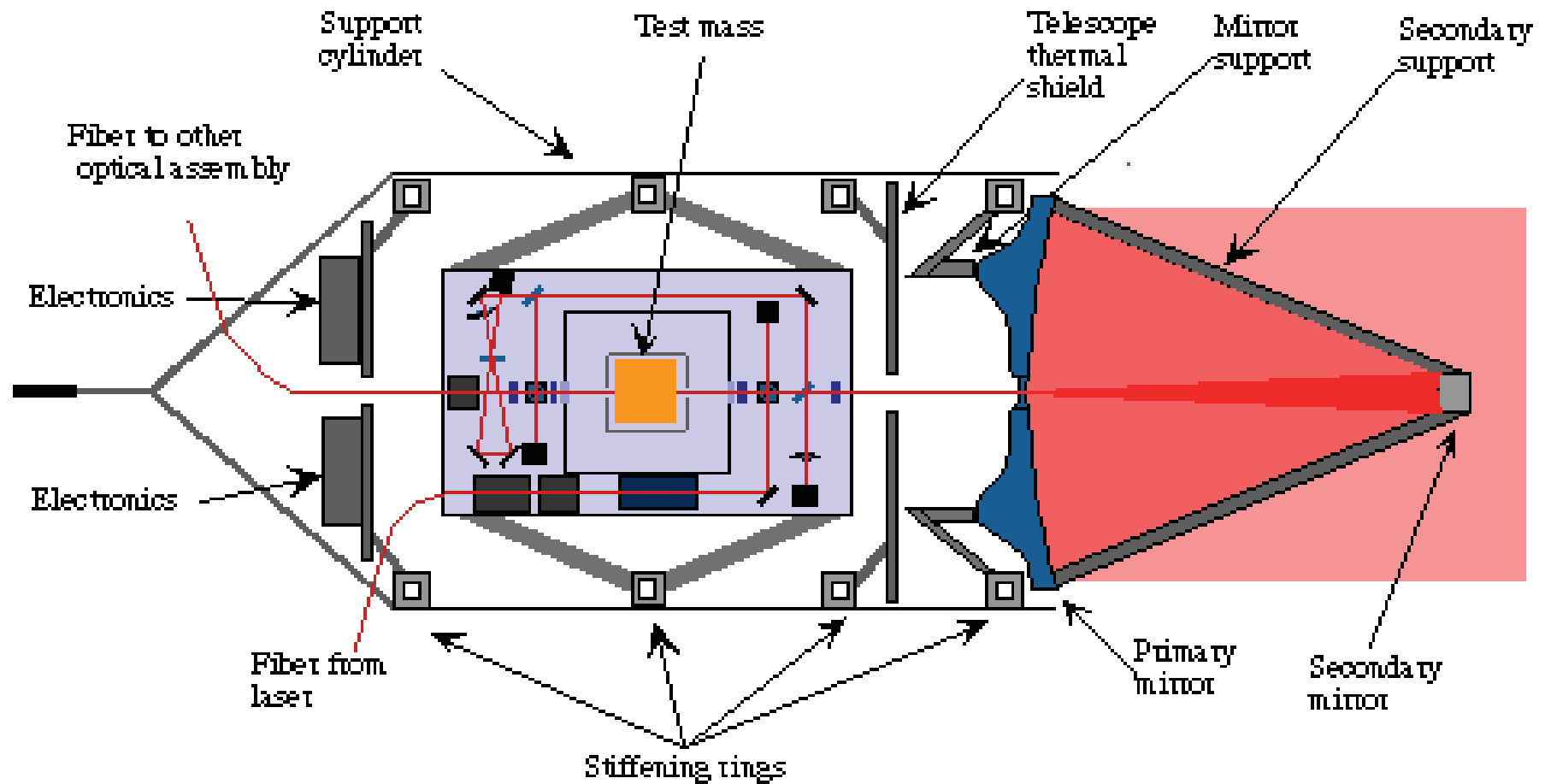


Przyszłe eksperymenty

LISA

Schemat pojedynczego modułu pomiarowego detektora LISA.

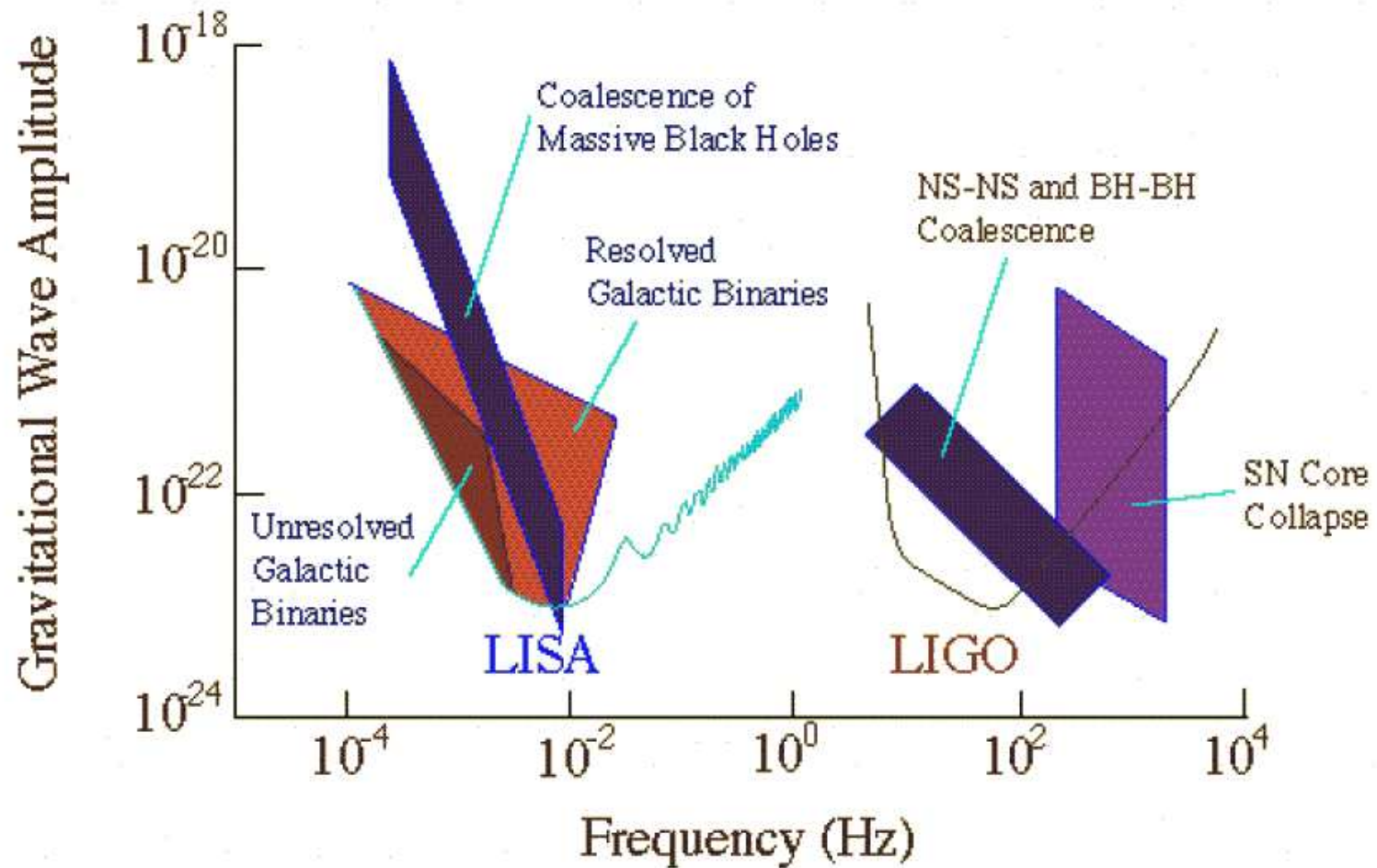
Interferometr mierzy odległość między całkowicie odizolowanymi “masami testowymi”



Przyszłe eksperymenty

LISA

Oczekiwana czułość i zakres częstotliwości w projekcie LISA



Przyszłe eksperymenty

eLISA

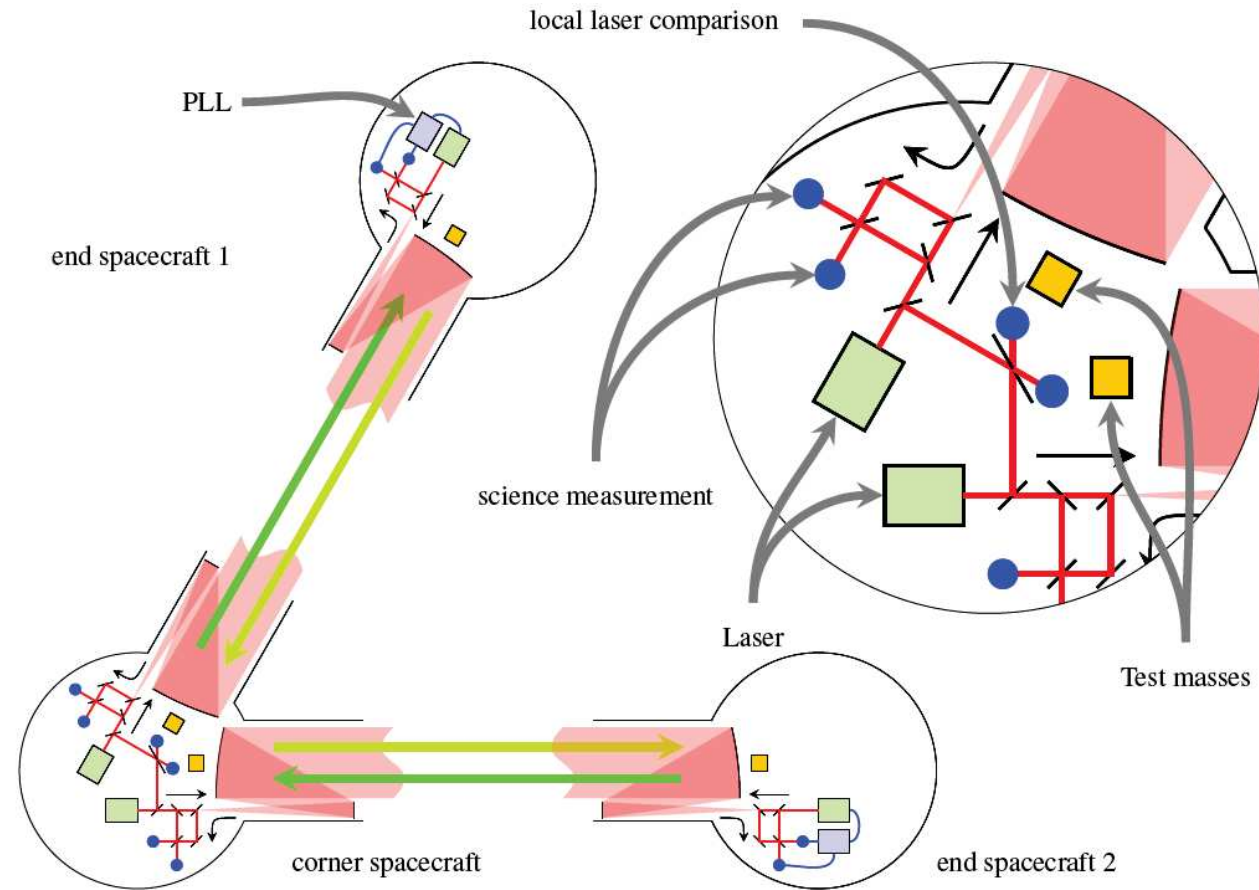
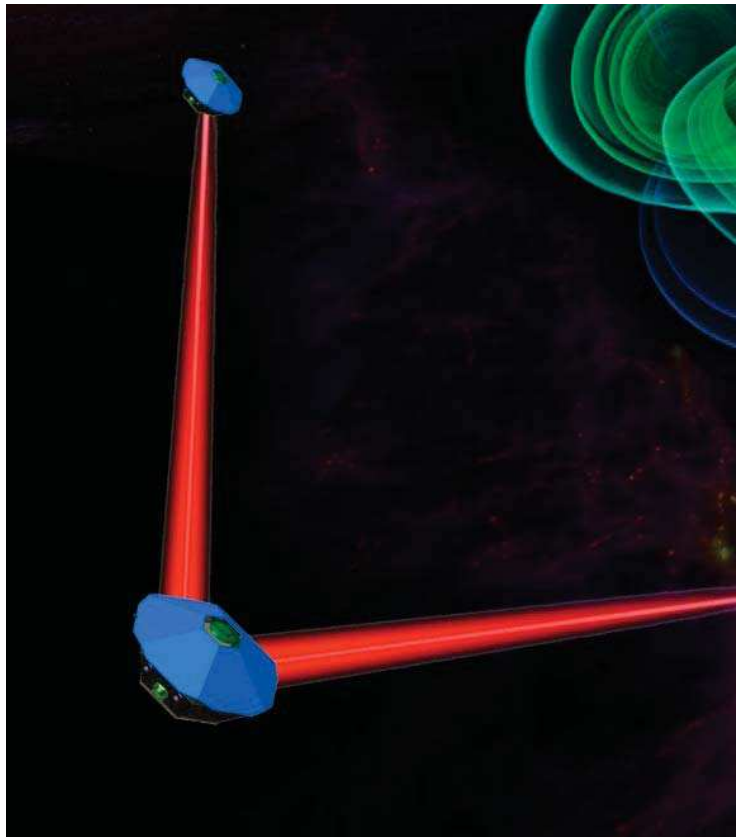
Po wycofaniu NASA projekt musiałby być przycięty do możliwości budżetowych ESA

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

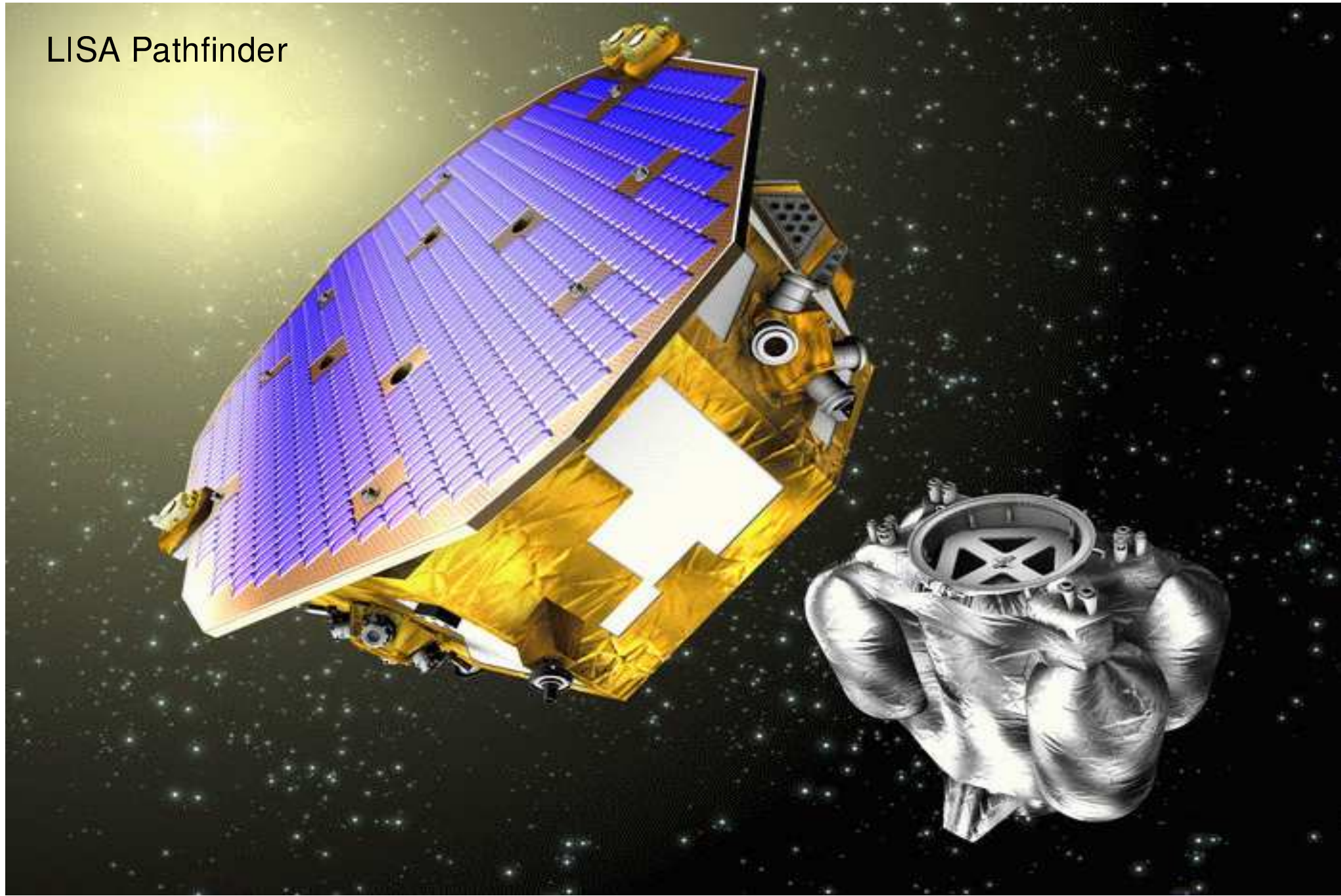
3 grudnia 2015 wystrzelony został próbnik testowy “LISA Pathfinder”, który miał przetestować kluczowe dla projektu podzespoły:

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

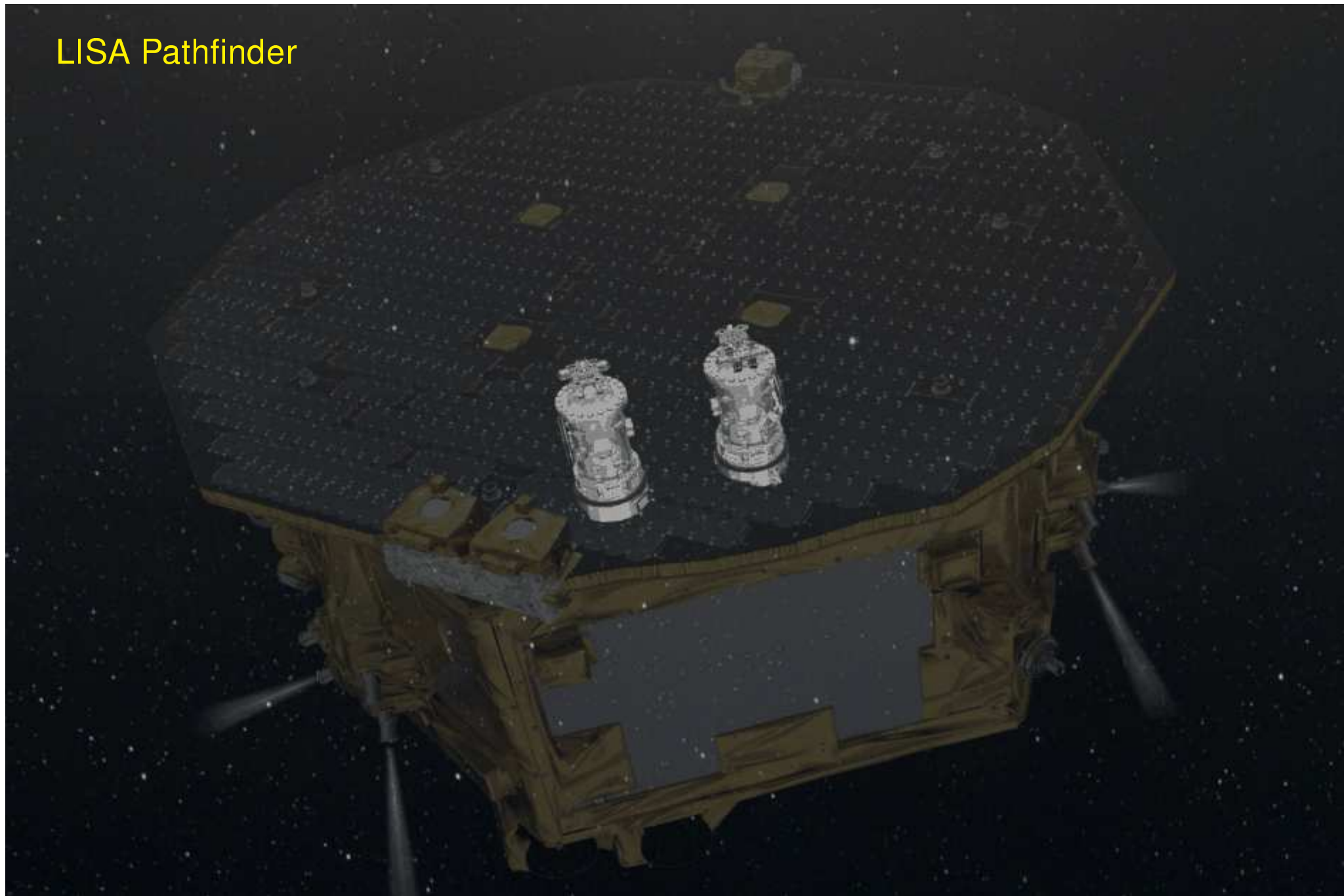
8 marca 2016 satelita rozpoczął pomiary w 1 punkcie Lagranga (LP1).

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

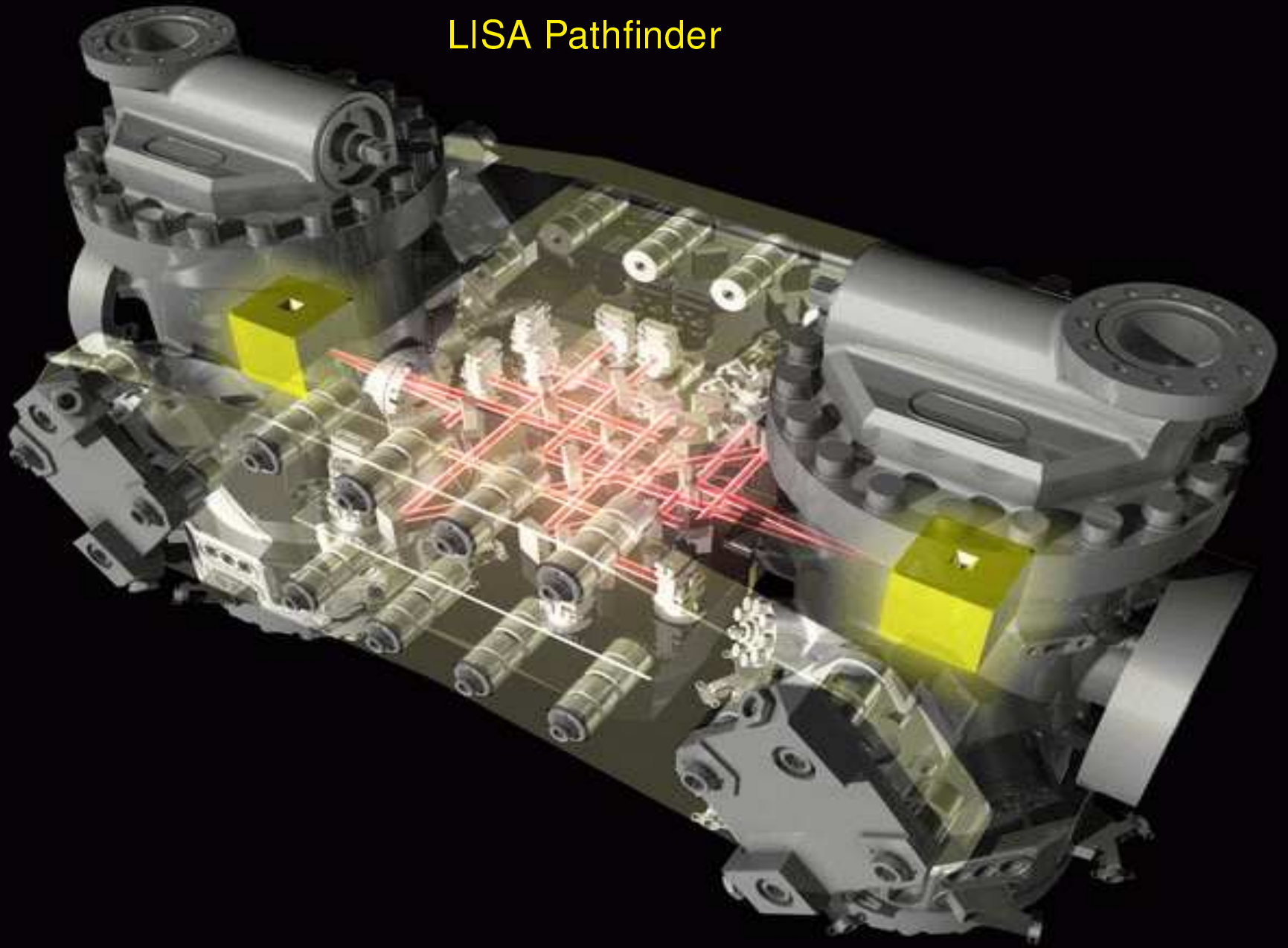
LISA Pathfinder



LISA Pathfinder



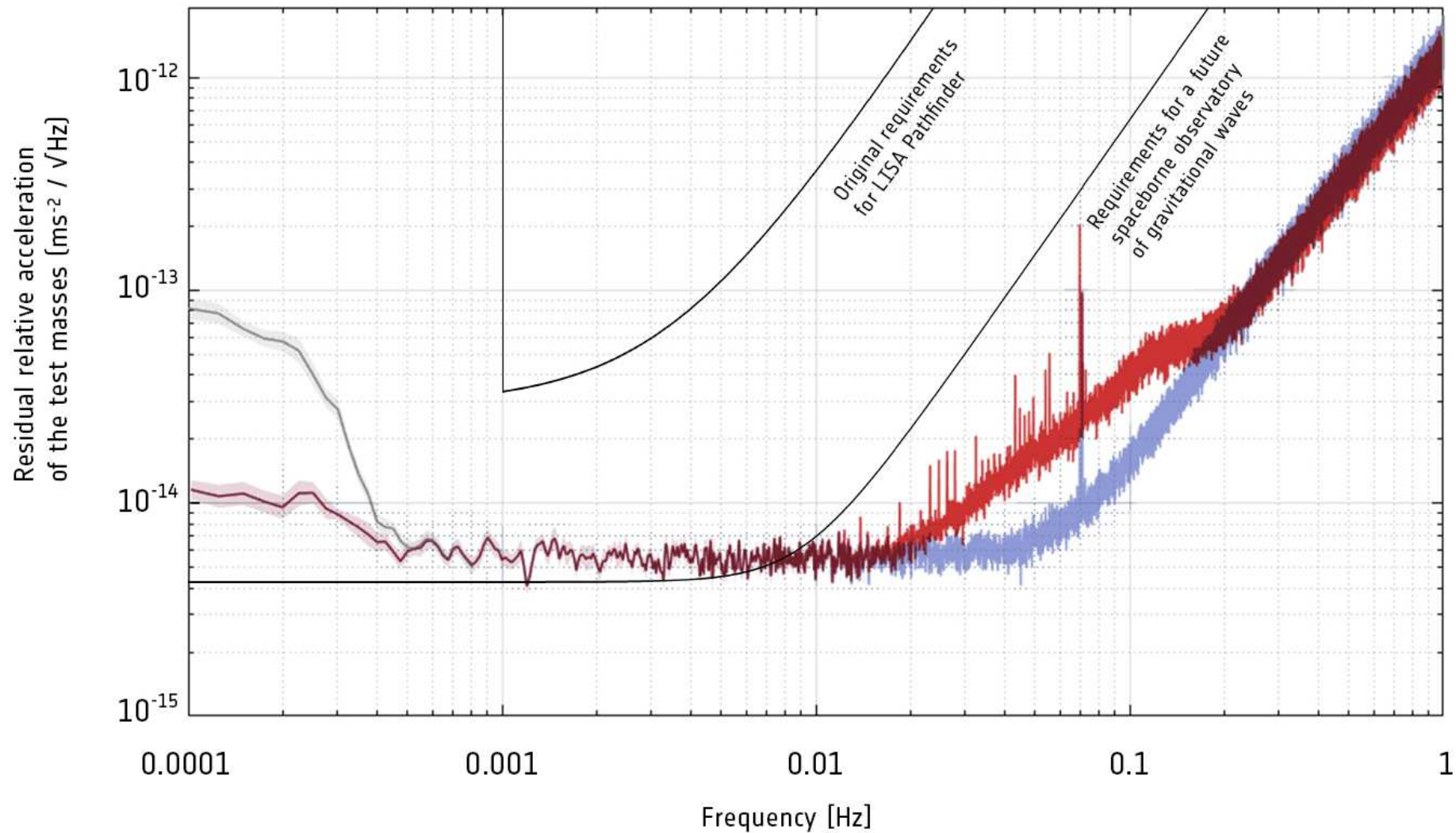
LISA Pathfinder



LISA Pathfinder

Pierwsze wyniki

7 czerwca 2016



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