

# Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład XIII

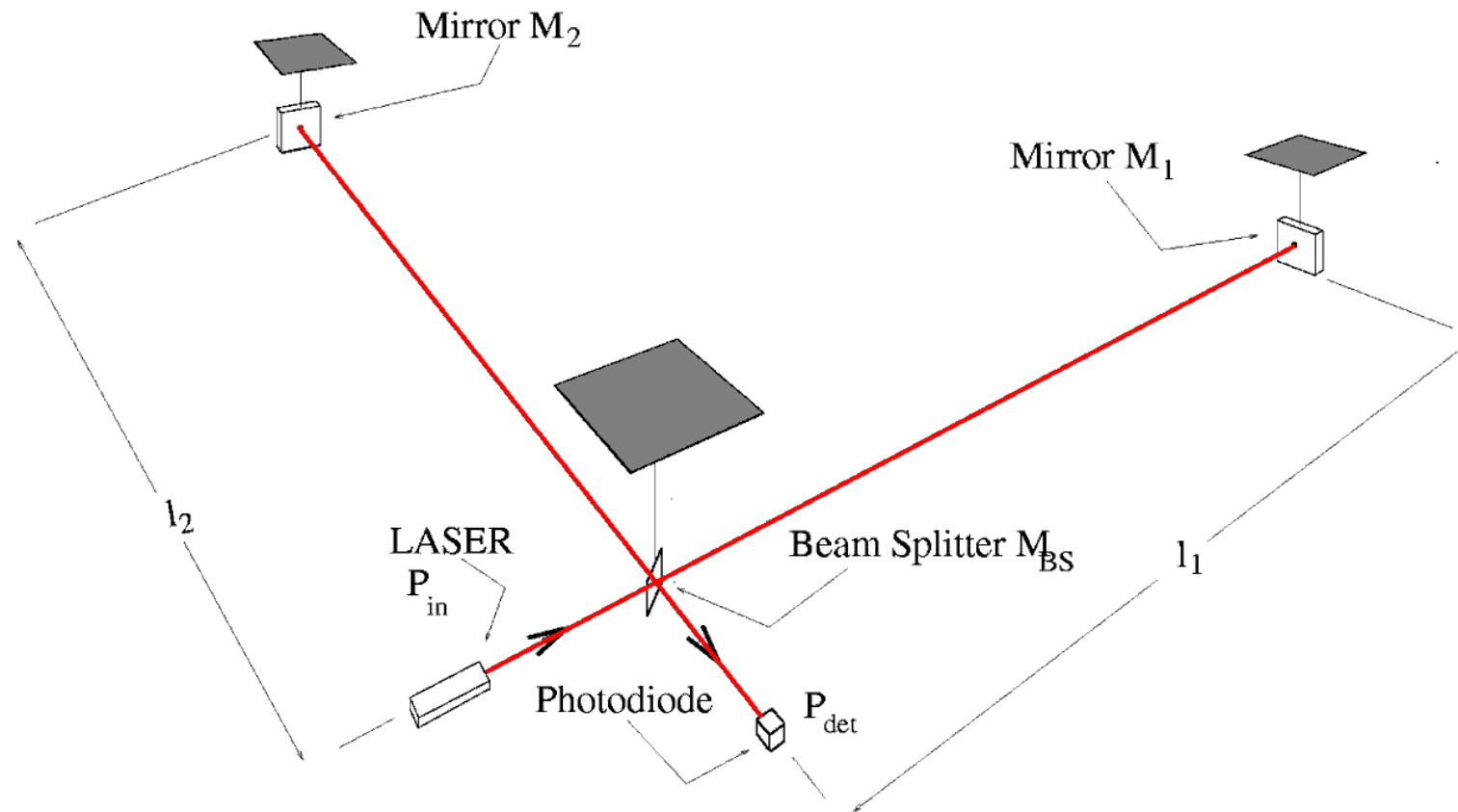
- GW150914
- Kolejne obserwacje
- GW170817 i co w nim takiego szczególnego
- Perspektywy badań

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometry

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

Pomiar różnicy w czasie propagacji światła w prostopadłych ramionach interferometru

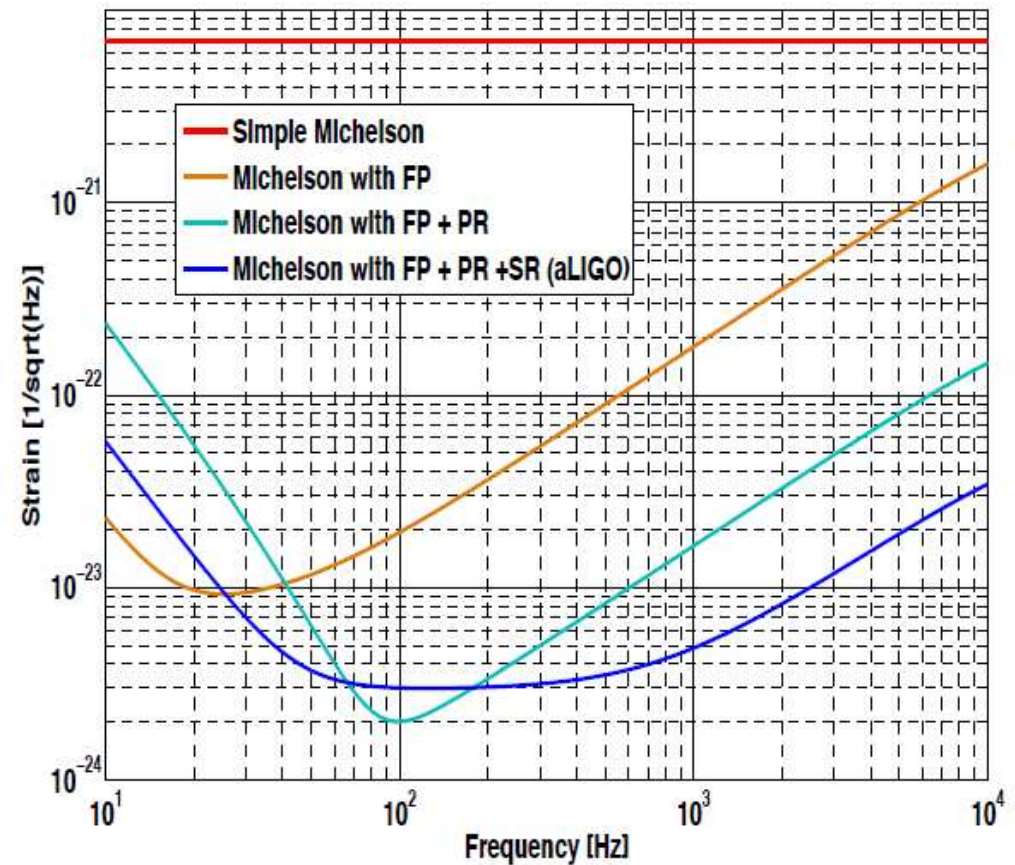
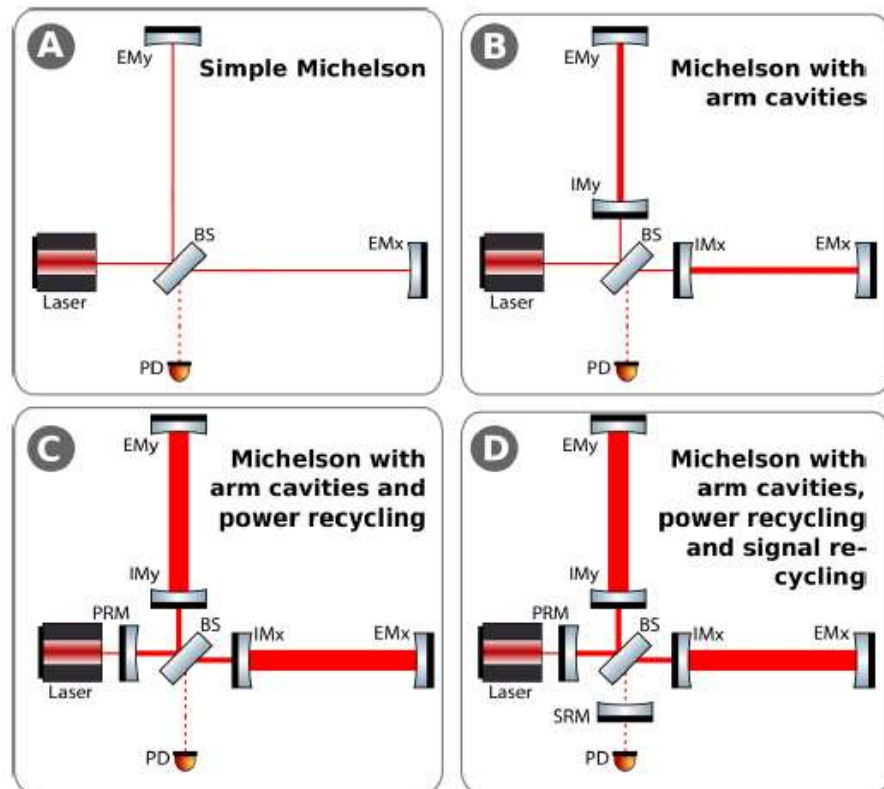


# Detekcja fal grawitacyjnych

## Interferometry

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

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



# VIRGO (Włochy)



# LIGO Hanford (USA)



# LIGO Livingston (USA)

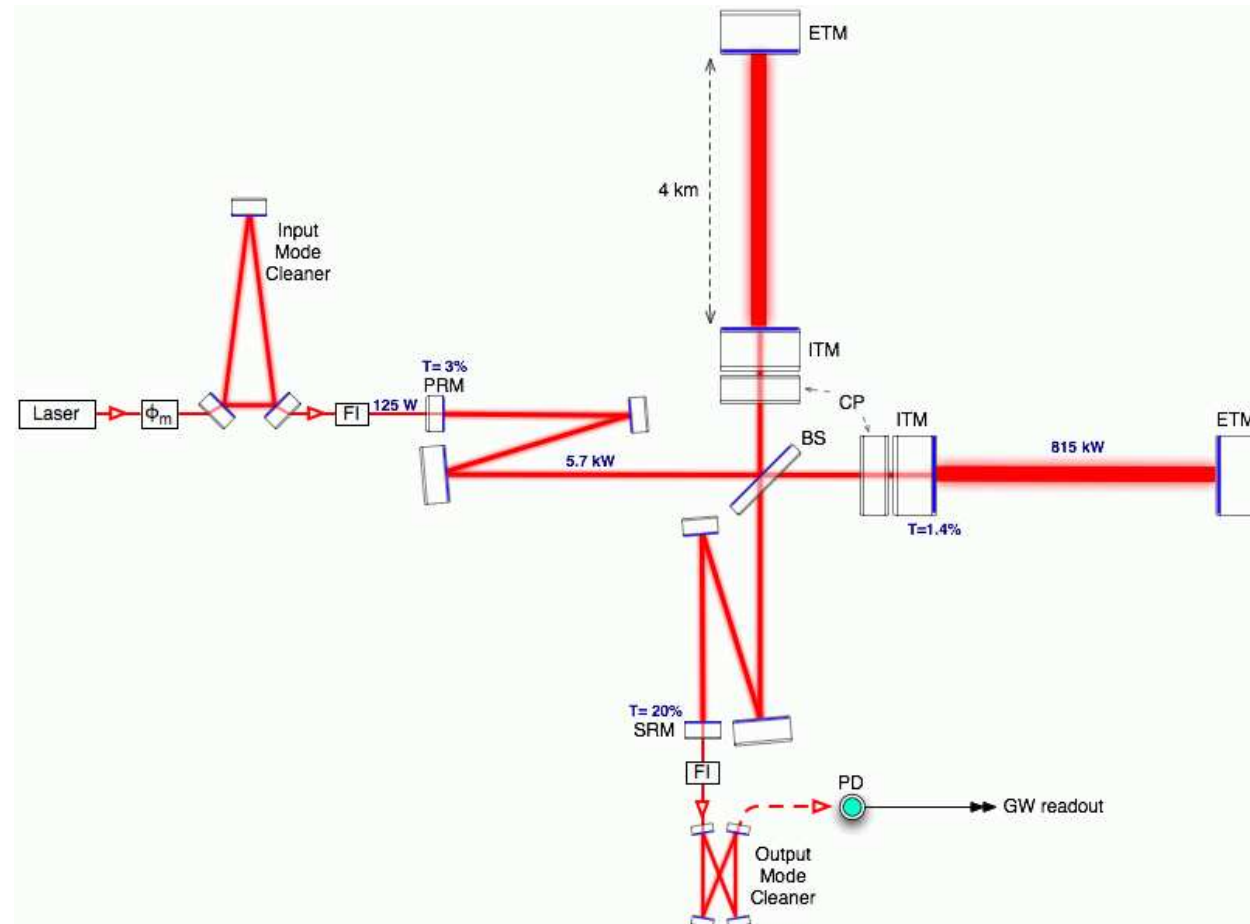


# Detekcja fal grawitacyjnych

## 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

# Advanced LIGO

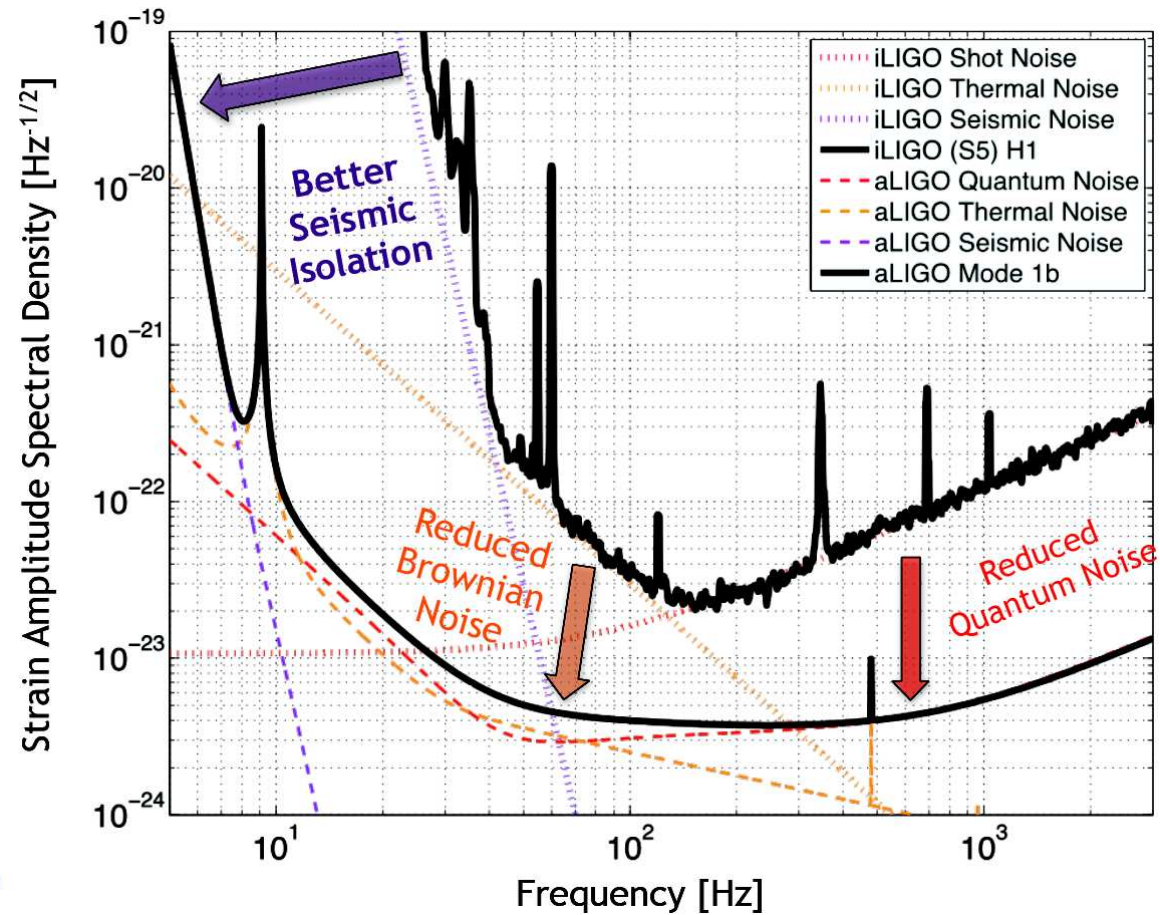




# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO

Zwiększenie czułości o rząd wielkości, poszerzenie zakresu częstości



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO + VIRGO

Zakładany harmonogram pracy zmodernizowanych detektorów:

O1                      O2                      O3

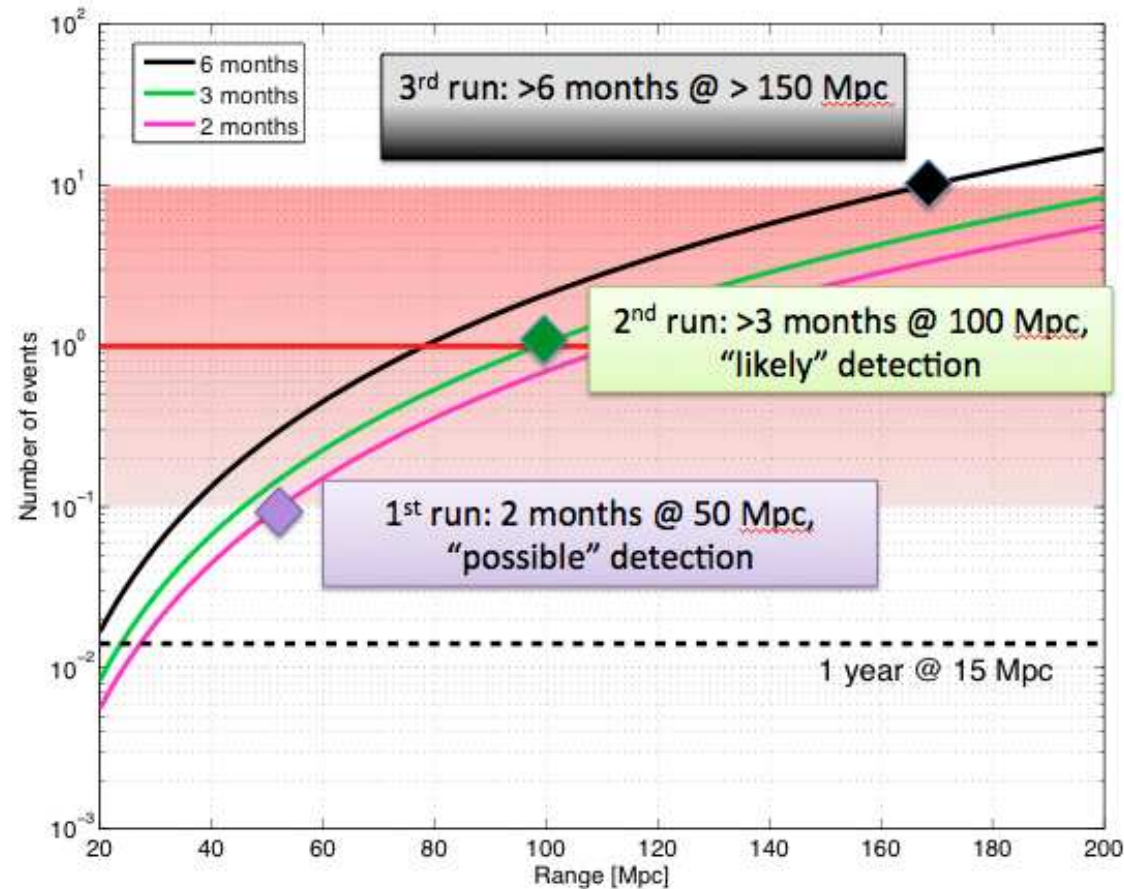
Epoch			2015 – 2016	2016 – 2017	2017 – 2018	2019+	2022+ (India)
Estimated run duration			4 months	6 months	9 months	(per year)	(per year)
Burst range/Mpc	LIGO		40 – 60	60 – 75	75 – 90	105	105
	Virgo		—	20 – 40	40 – 50	40 – 80	80
BNS range/Mpc	LIGO		40 – 80	80 – 120	120 – 170	200	200
	Virgo		—	20 – 60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

Rozpoczęcie tzw. “Run O1” planowane było na 18 września 2015.

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Advanced LIGO

Oczekiwana liczba detekcji fal grawitacyjnych na kolejnych etapach:

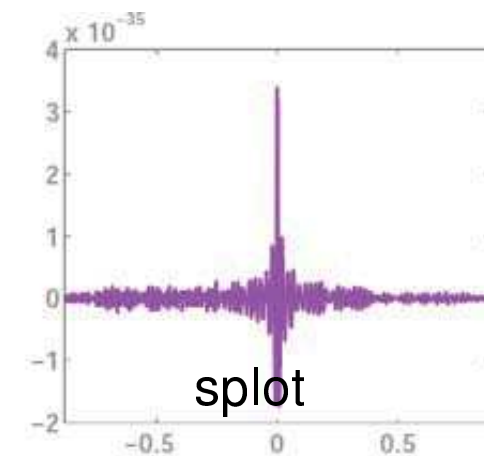
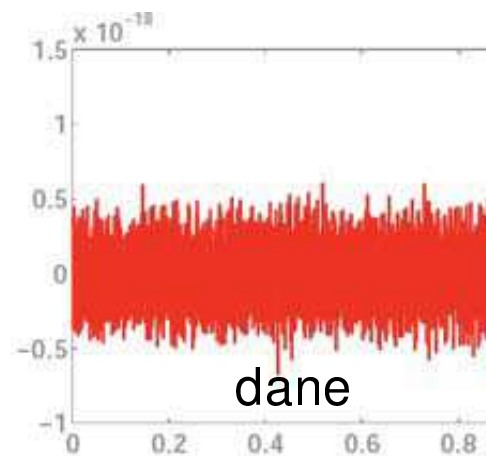
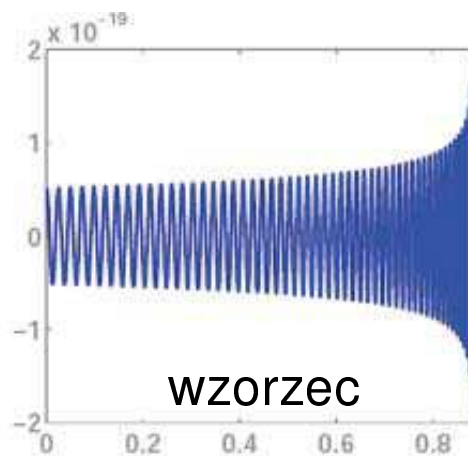
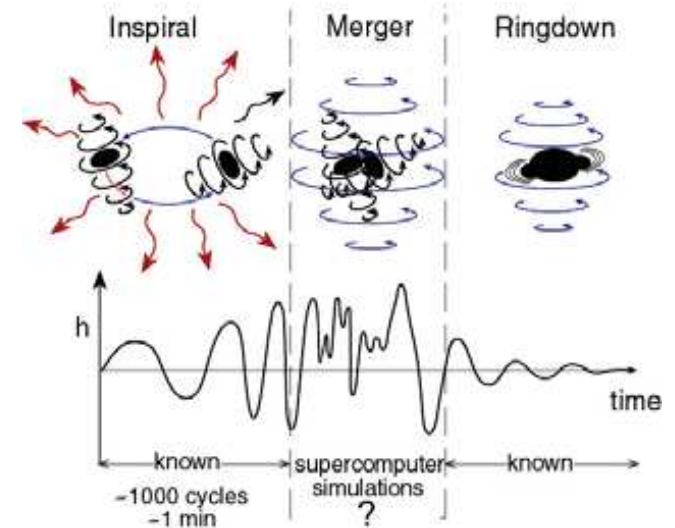


# Detekcja fal grawitacyjnych

## Analiza sygnału CBC - Compact Binary Coalescence

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

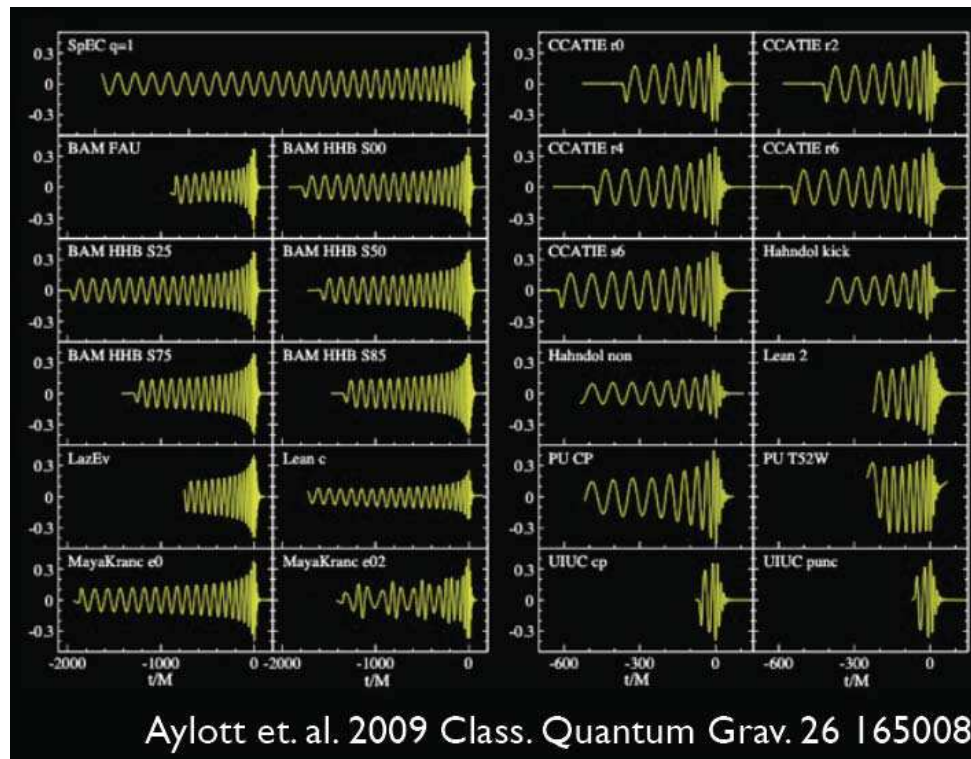
Możemy porównywać wzorzec z danymi



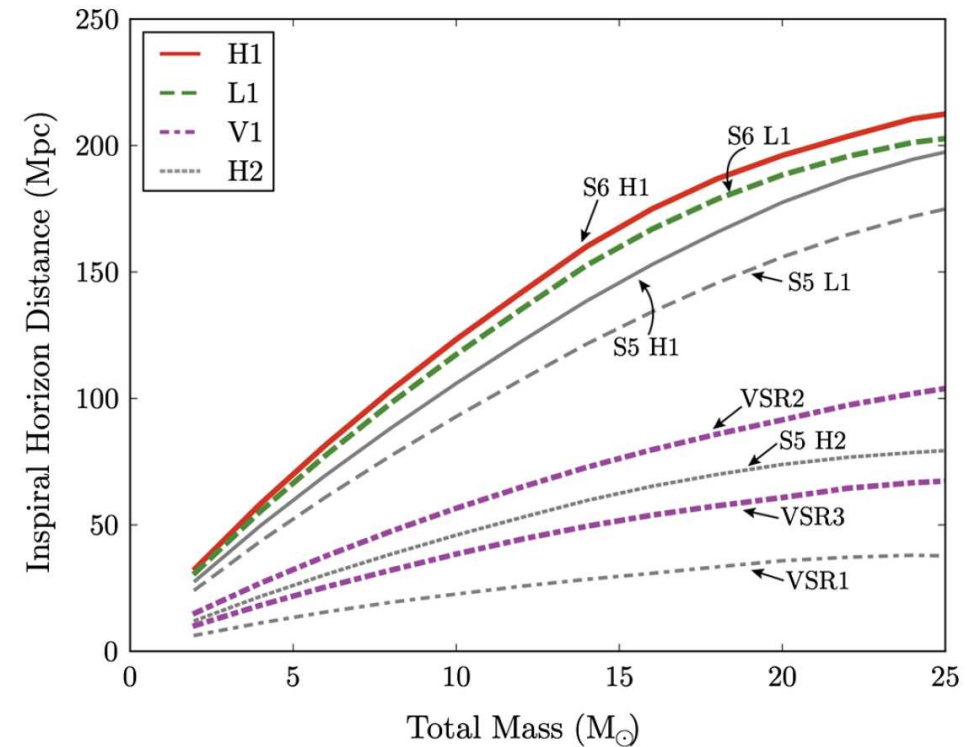
# Detekcja fal grawitacyjnych

## Analiza sygnału

Przykładowy zestaw wzorców



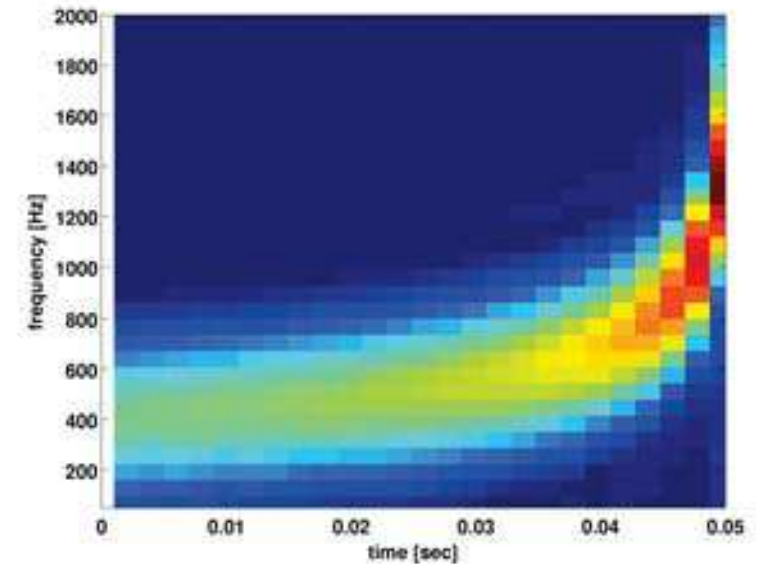
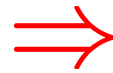
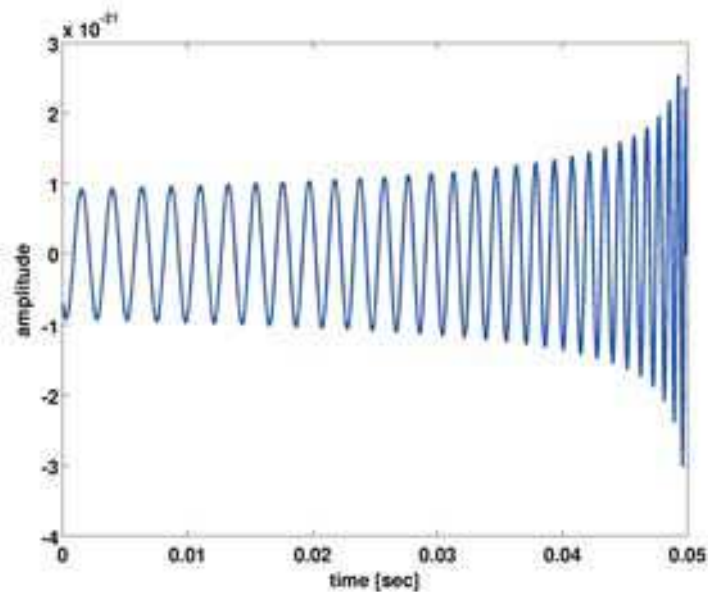
Szacowany zasięg przy detekcji zlewającego się układu podwójnego



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Analiza sygnału

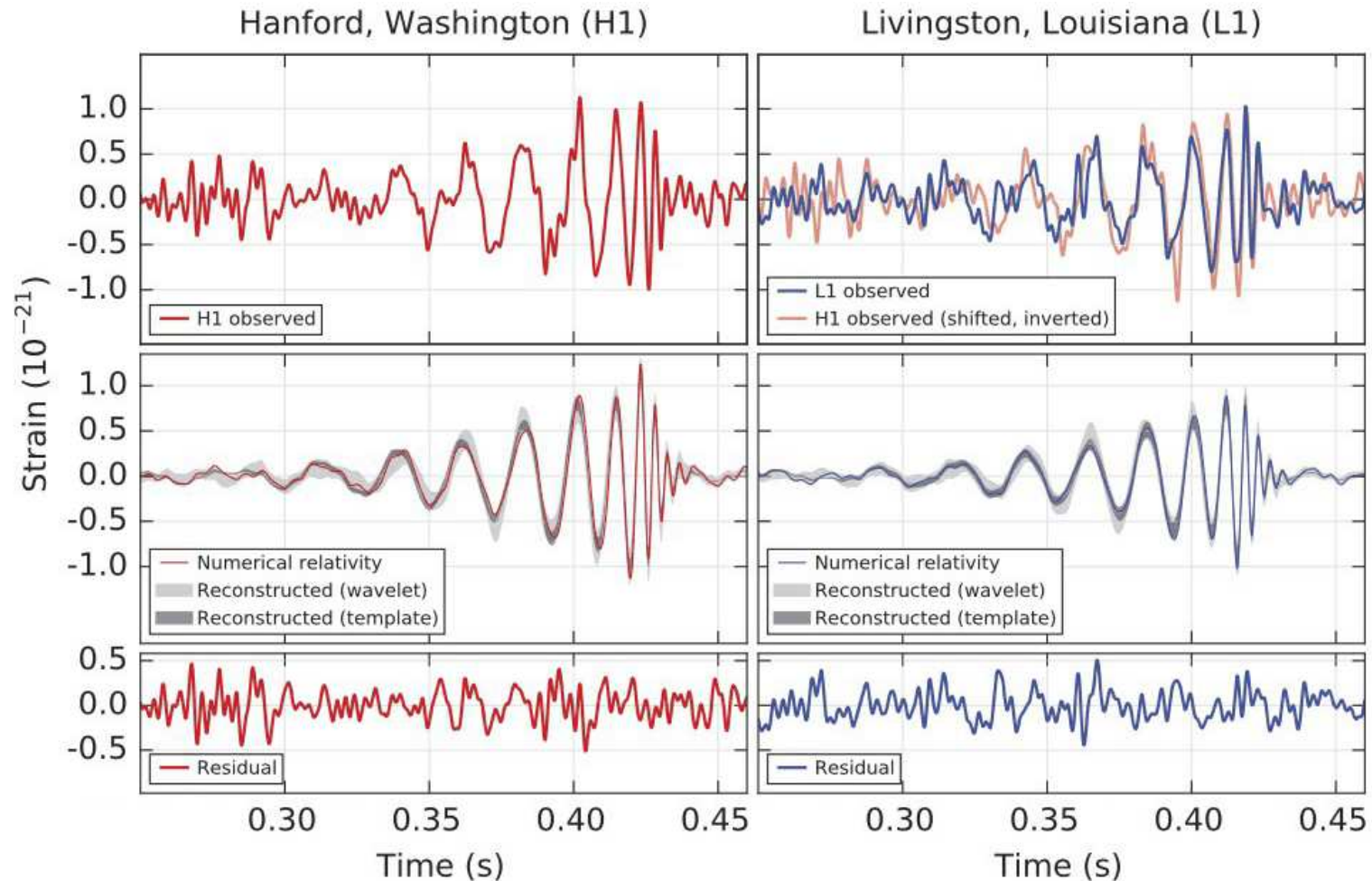
Alternatywne podejście: szukanie “rozbłysku” na mapie czas-częstość



# GW150914

## Odkrycie

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



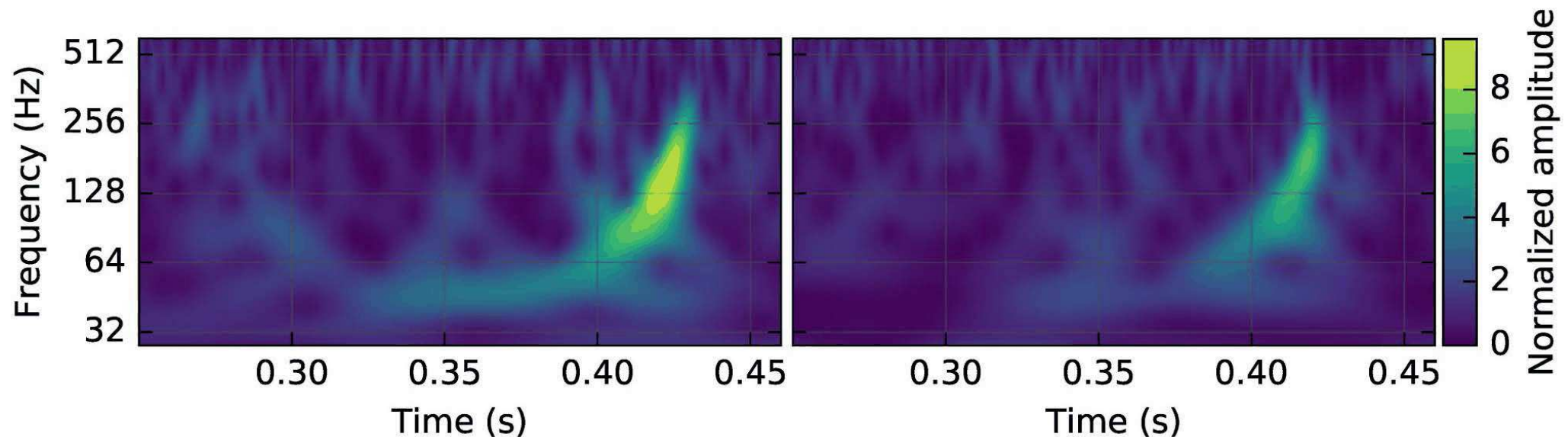
# GW150914

## 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



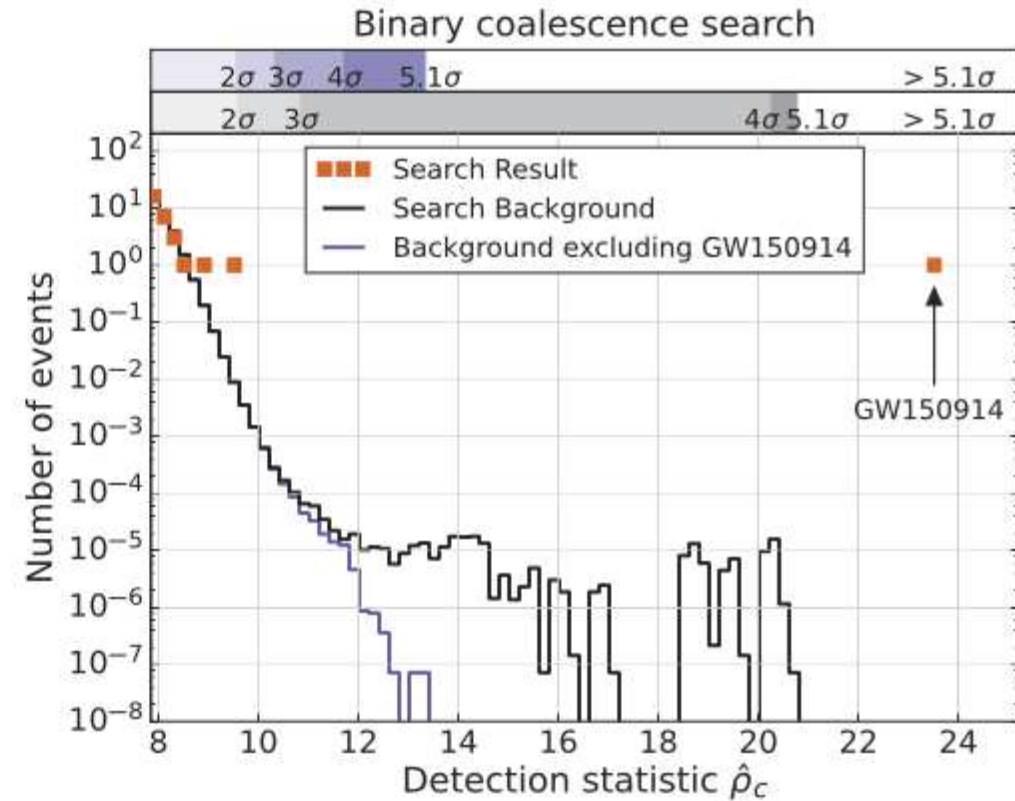
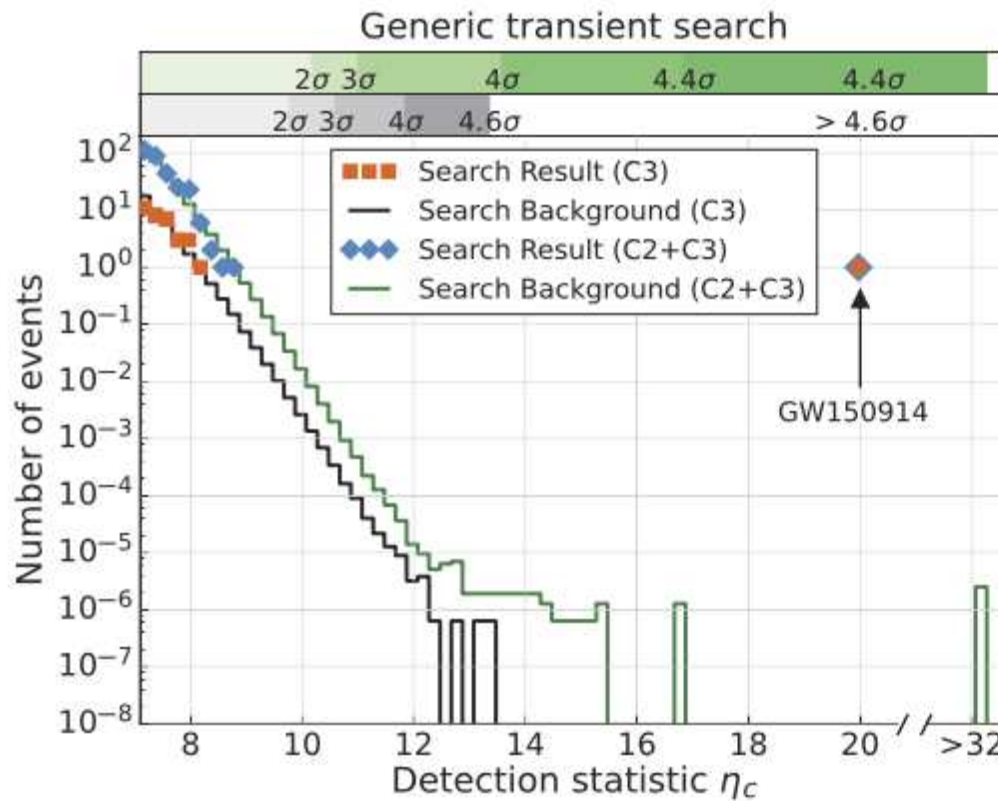
4 dni przed oficjalnym rozpoczęciem zbierania danych...



# GW150914

## Odkrycie

## Ocena tła



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

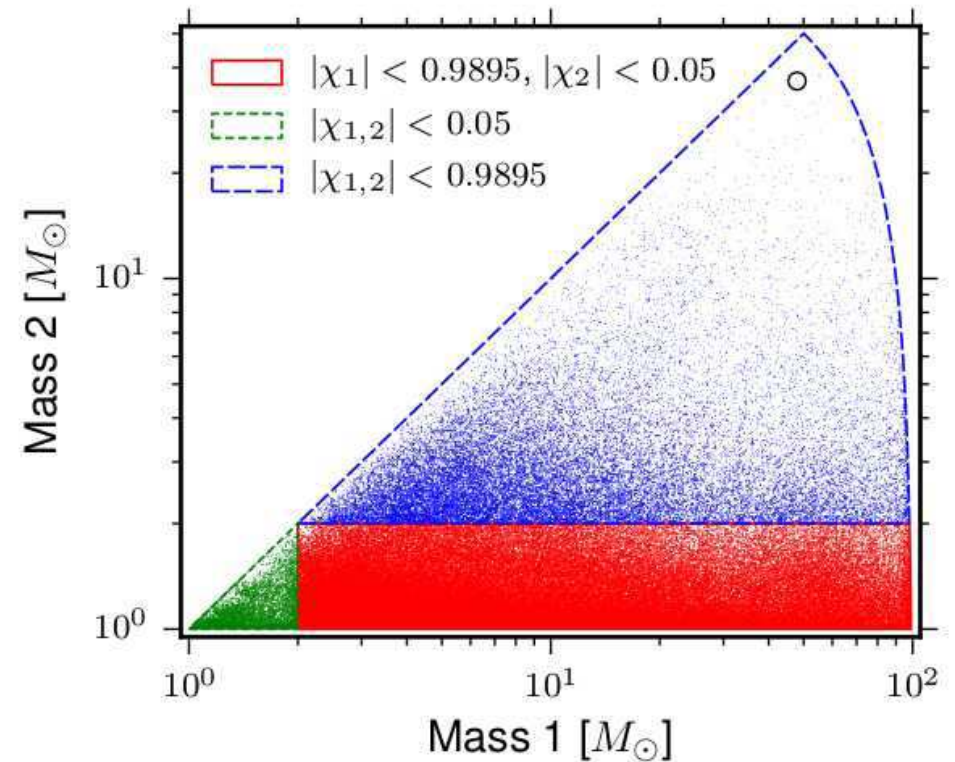
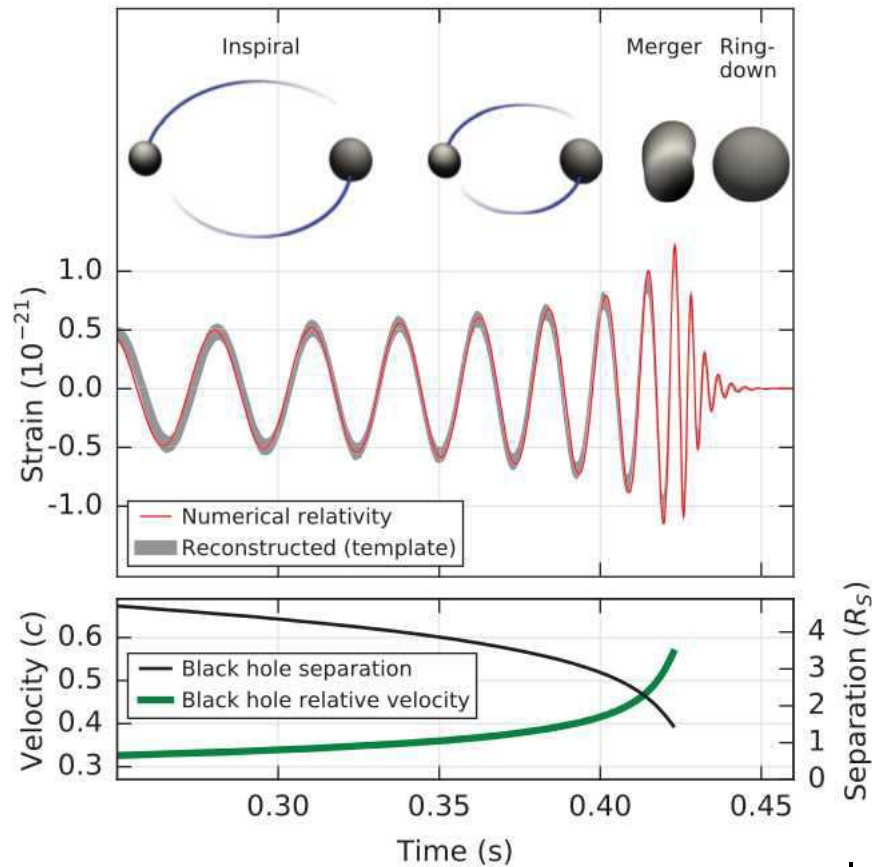
Poszukiwanie przypadków typu CBC: znaczoność na poziomie  $> 5.1\sigma$

⇒ oczekiwane tło poniżej 1 przypadku na 203 000 lat

# GW150914

## Odkrycie

Dopasowany wzorzec w samym rogu rozważanego zakresu mas (!)



⇒ zlanie się dwóch bardzo masywnych czarnych dziur

## Czarne dziury

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

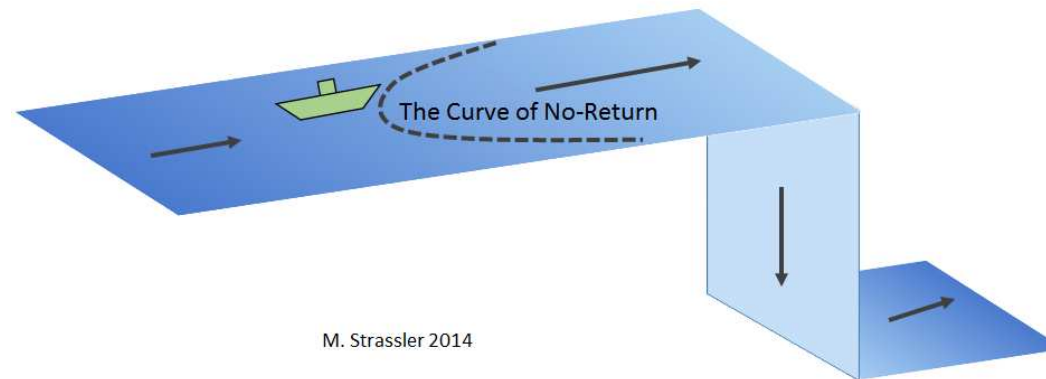
W przypadku zderzających się czarnych dziur mamy dodatkowo **orbitalny moment pędu**

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 (!)

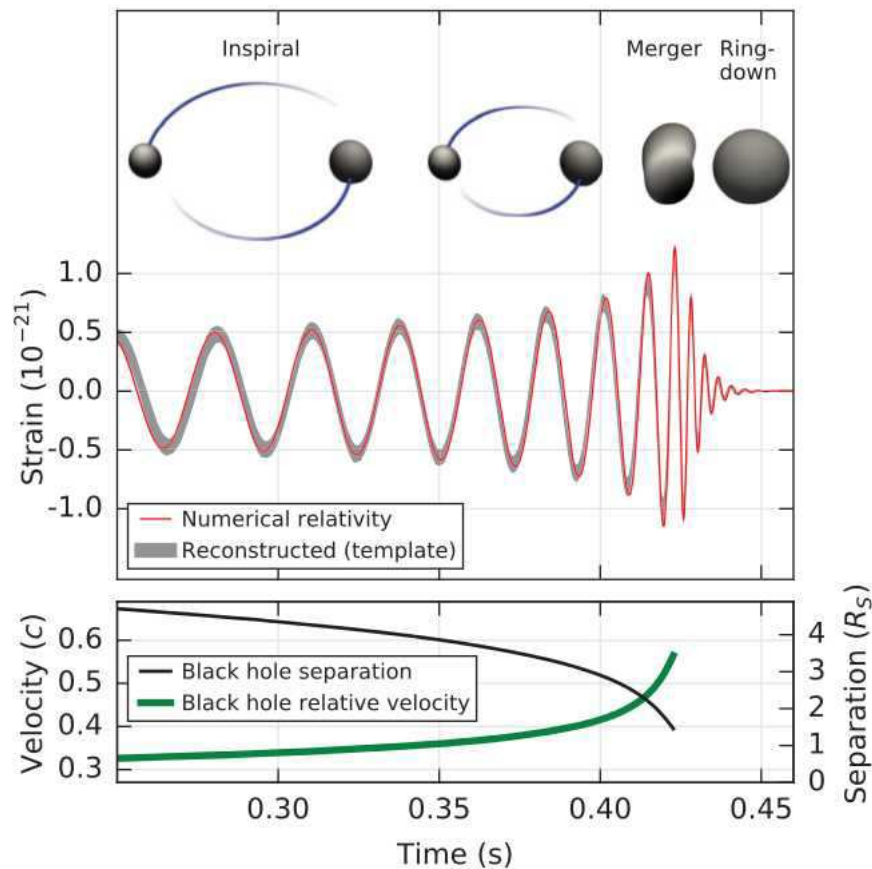
A Person In a Boat that Crosses the Curve of No-Return Will Notice Nothing at the Time, But is Doomed To Go Over The Waterfall



# 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:

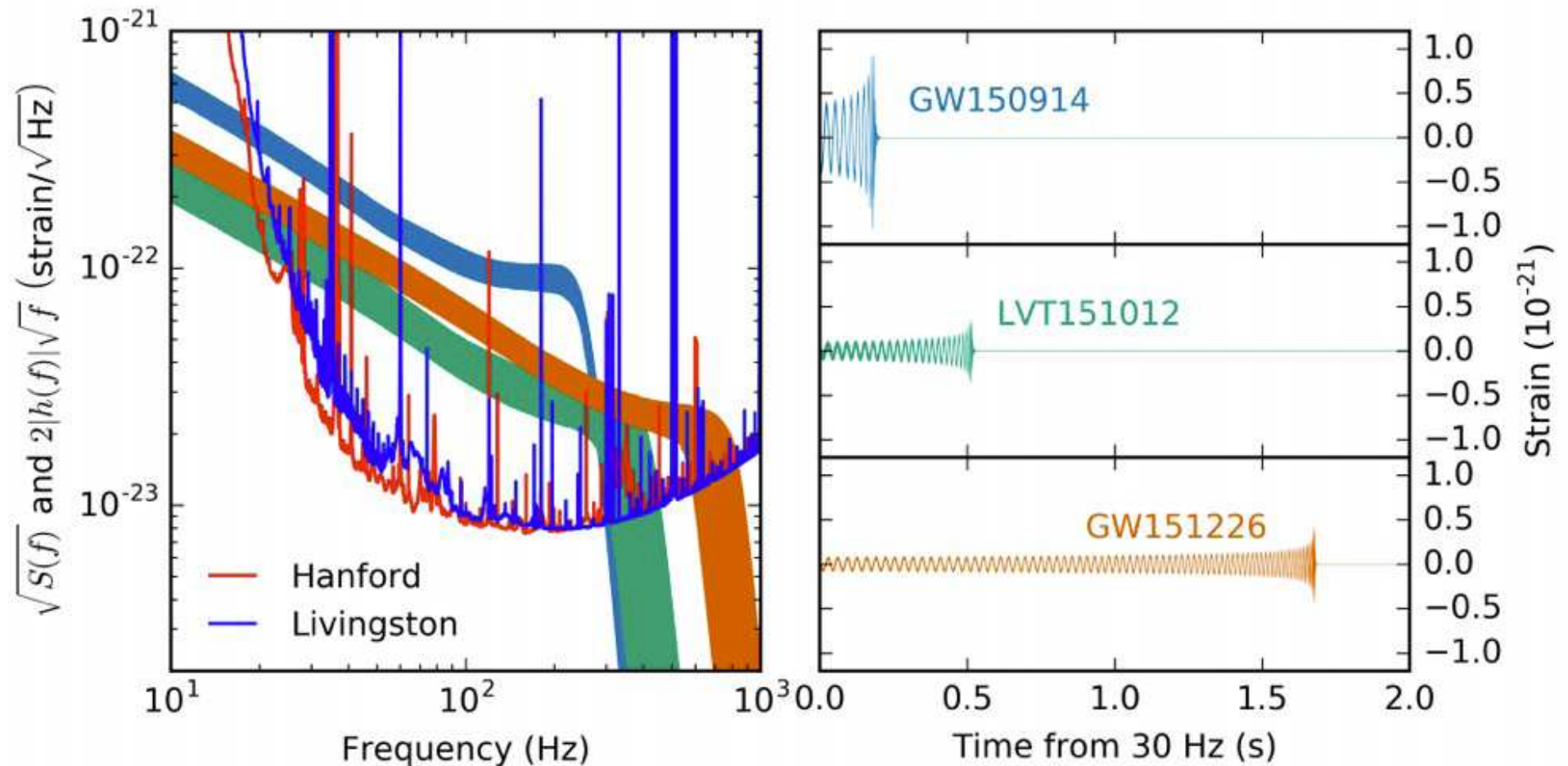
$$d = 410_{-180}^{+160} Mpc$$

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

# Kolejne detekcje

## Wyniki LIGO 2015

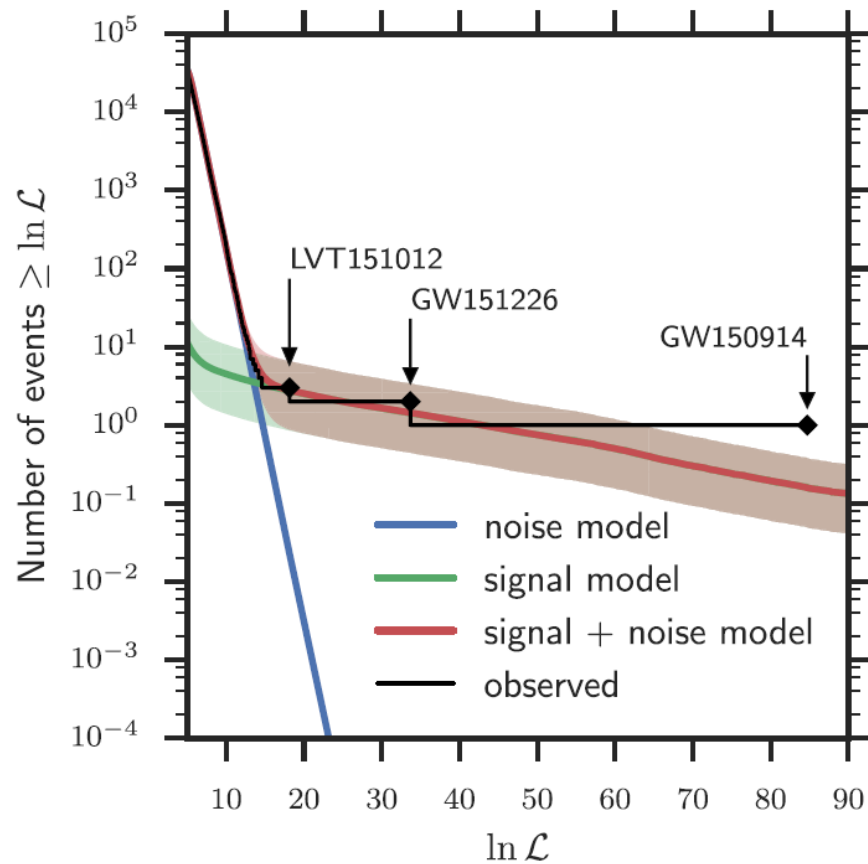
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w roku 2015: jeden “pewny” (GW151226) i jeden “kandydat” (LVT151012)



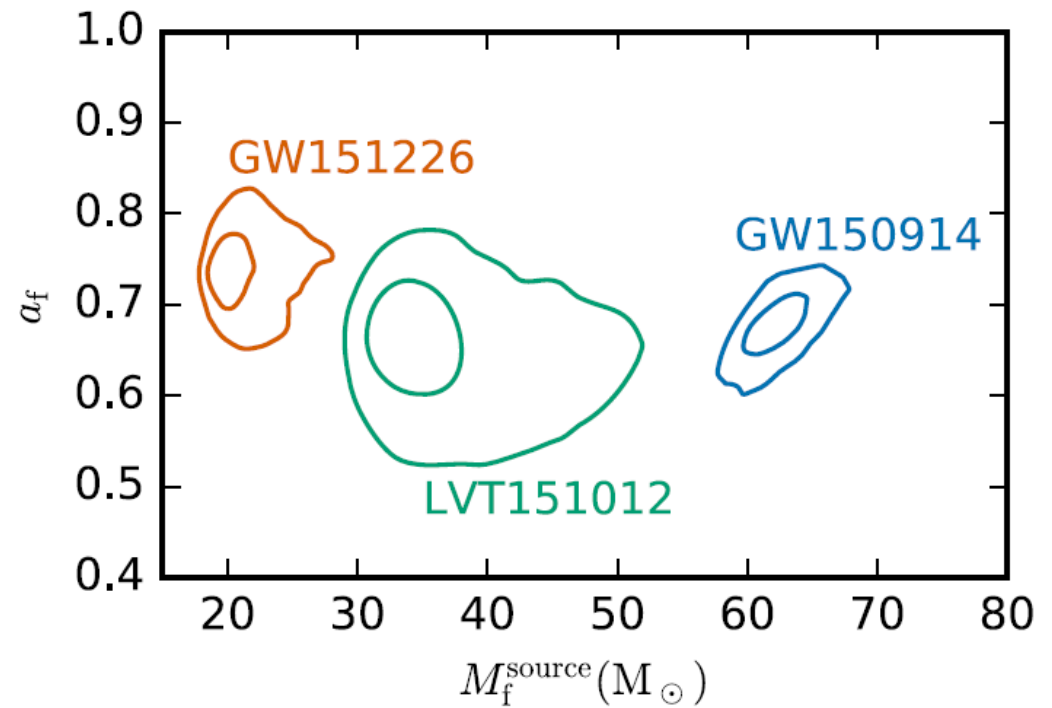
# Kolejne detekcje

## Wyniki LIGO 2015

### Oczekiwane tło



### Masa i spin końcowej czarnej dziury



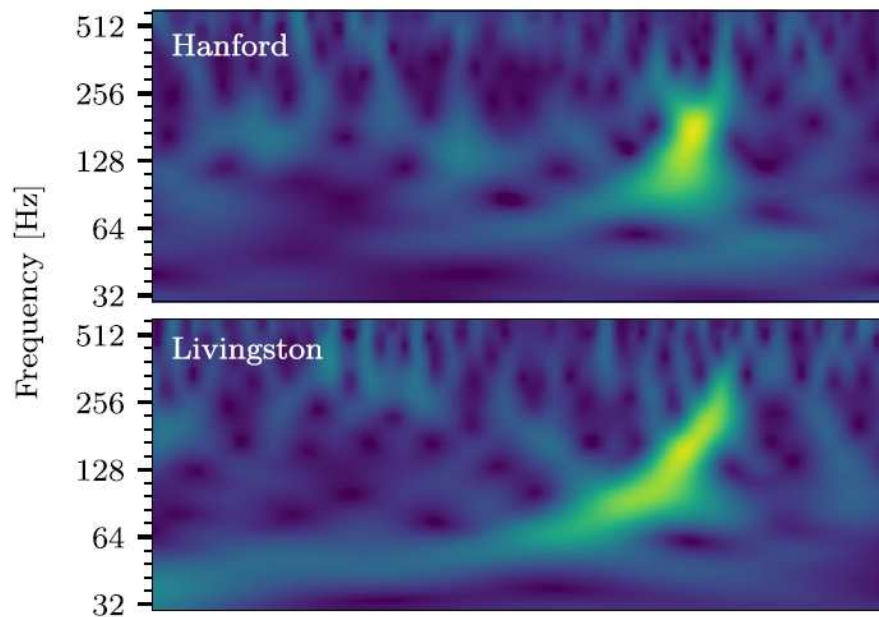
# Kolejne detekcje

## Przypadek 2017

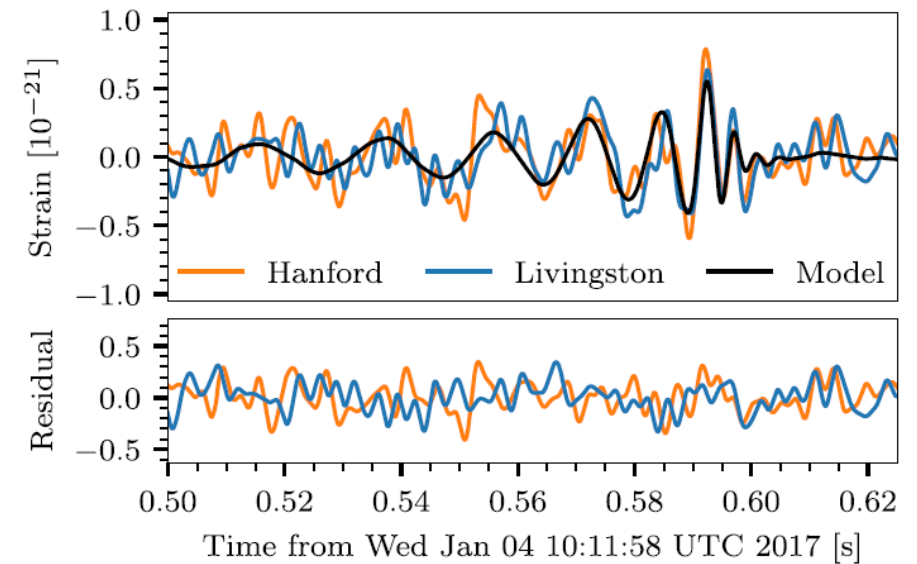
Zaprezentowany 1 czerwca 2017

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

### Widmo częstości



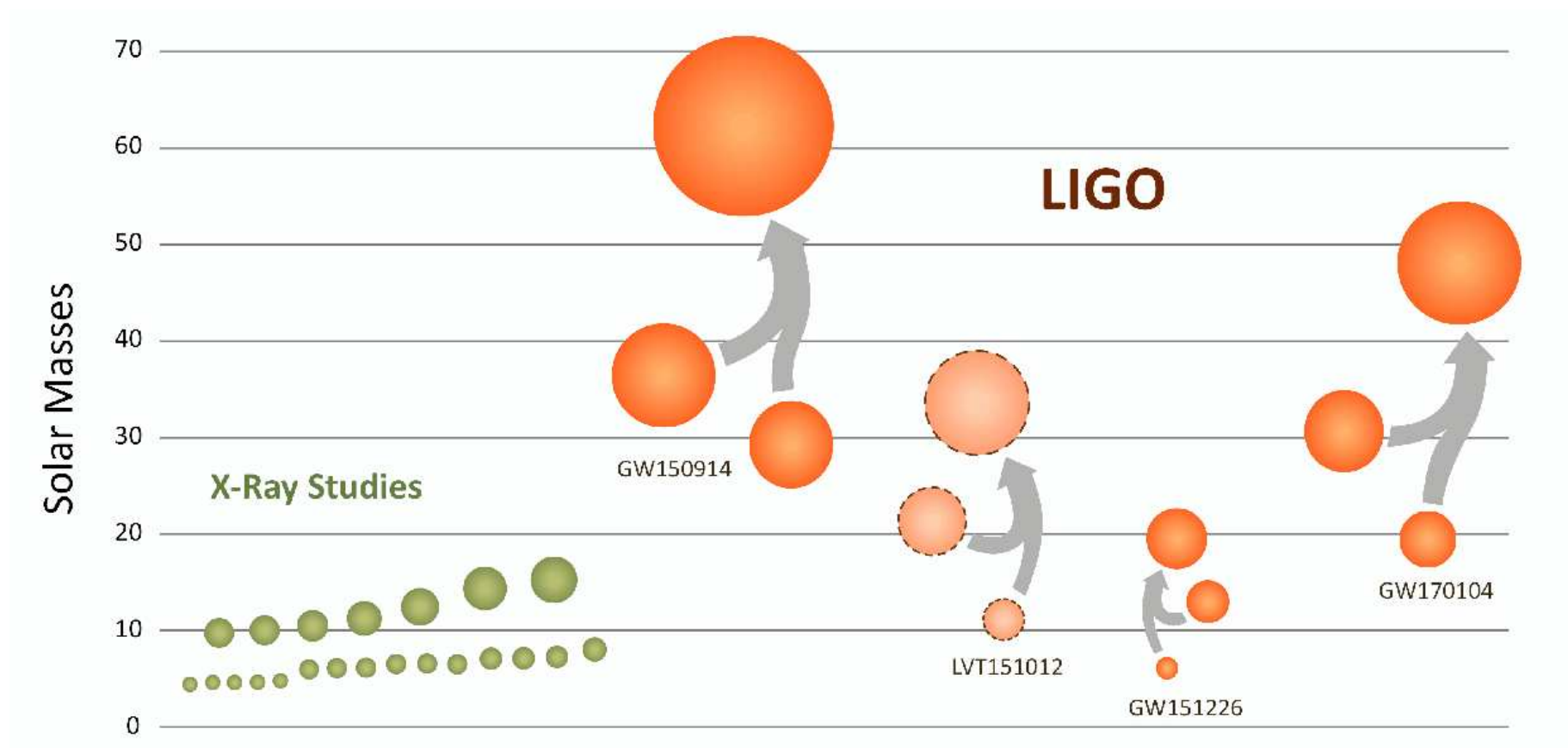
### Dopasowanie wzorca



# 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...

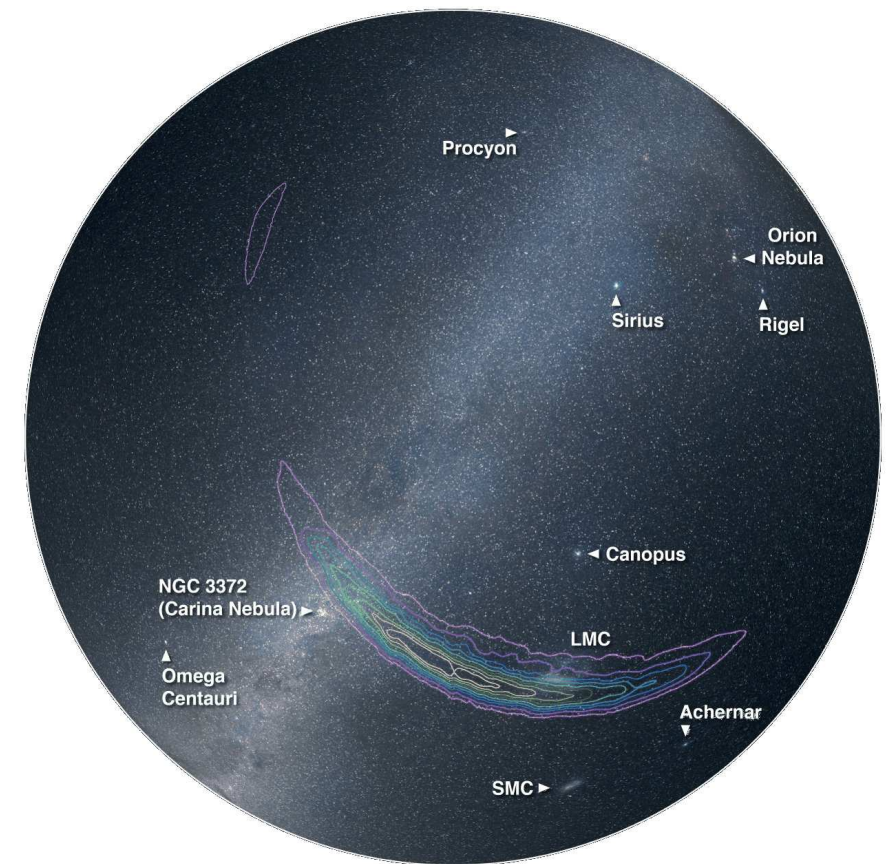
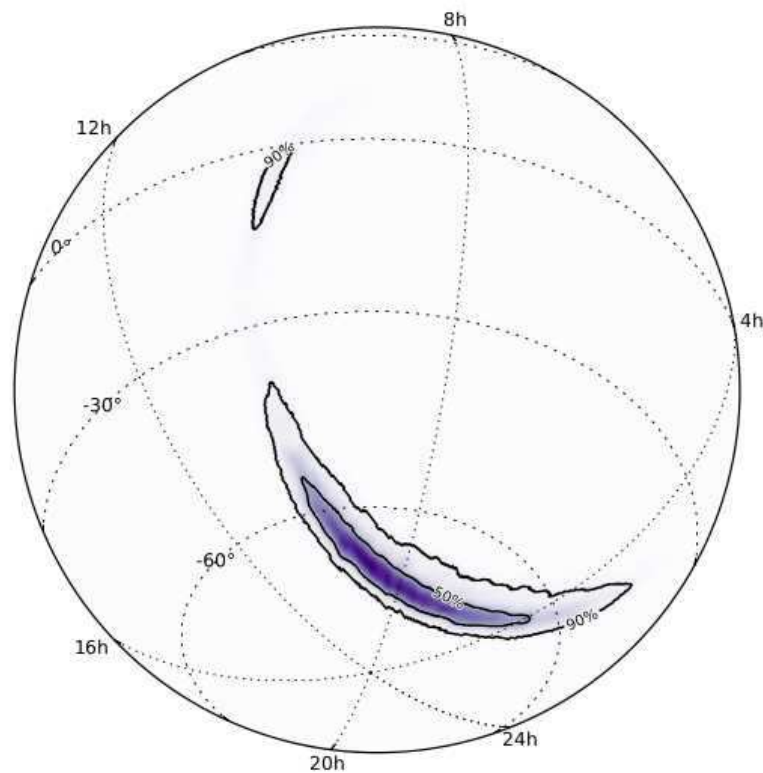




# GW150914

## Położenie

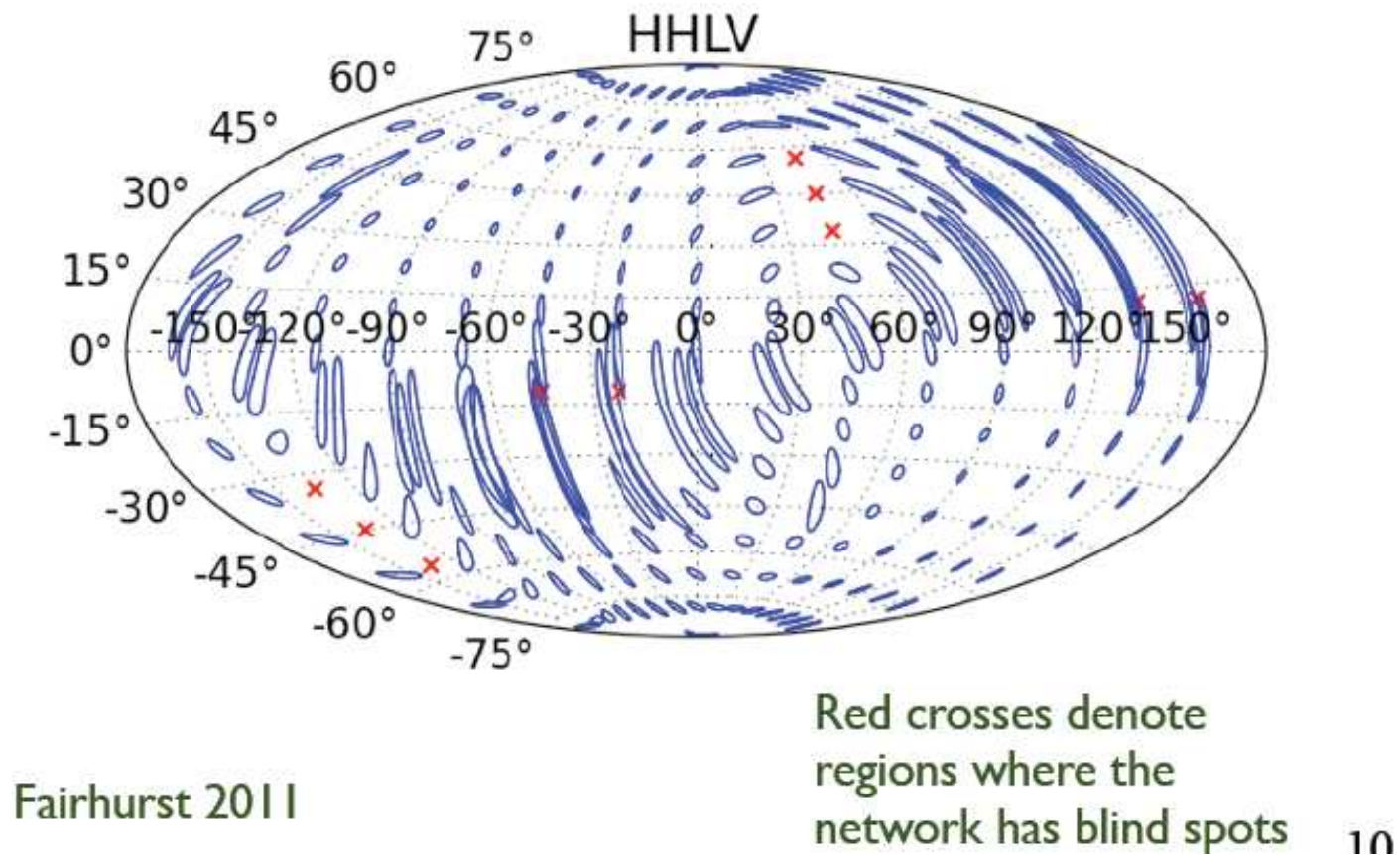
Niestety, w oparciu o pomiar w dwóch interferometrach nie jest możliwe jednoznaczne określenie pozycji. Nie zidentyfikowano potencjalnego źródła...



# Detekcja fal grawitacyjnych

## Położenie

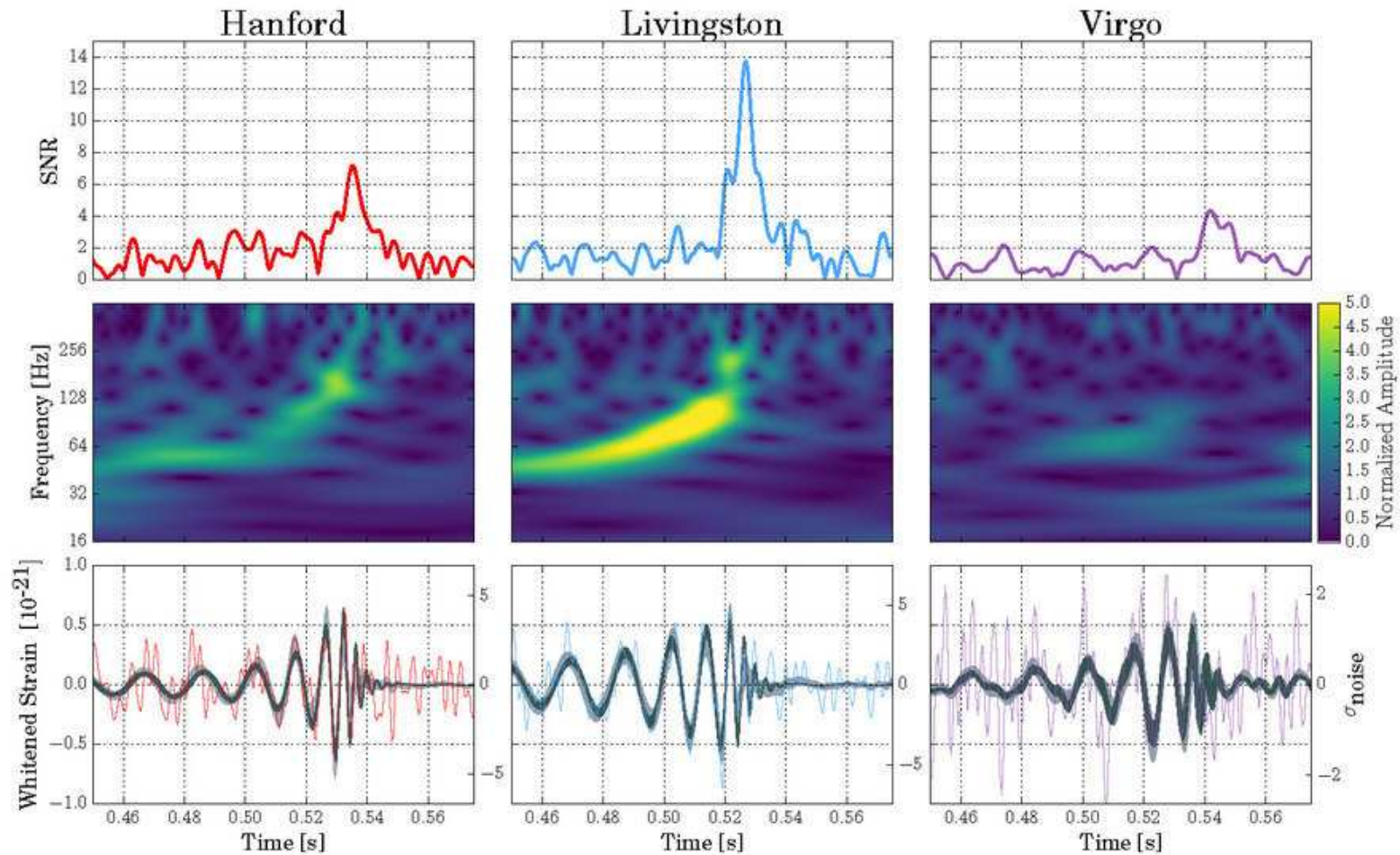
Znacznie dokładniejsze wyznaczanie pozycji stało się dopiero możliwe po uruchomieniu detektora VIRGO w sierpniu 2017 (rok opóźnienia przez problemy techniczne)



# GW170814

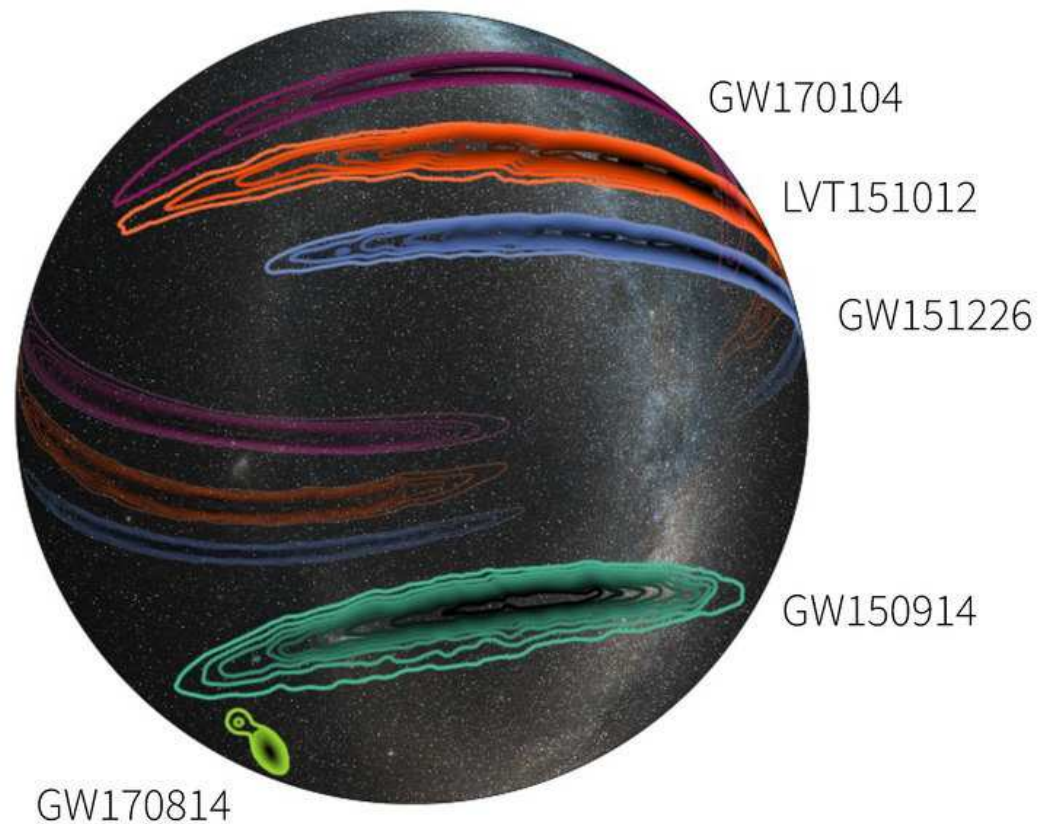
## Potrójna detekcja

VIRGO włączyło się w zbieranie danych 1 sierpnia 2017



GW170814

Dużo lepsza lokalizacja

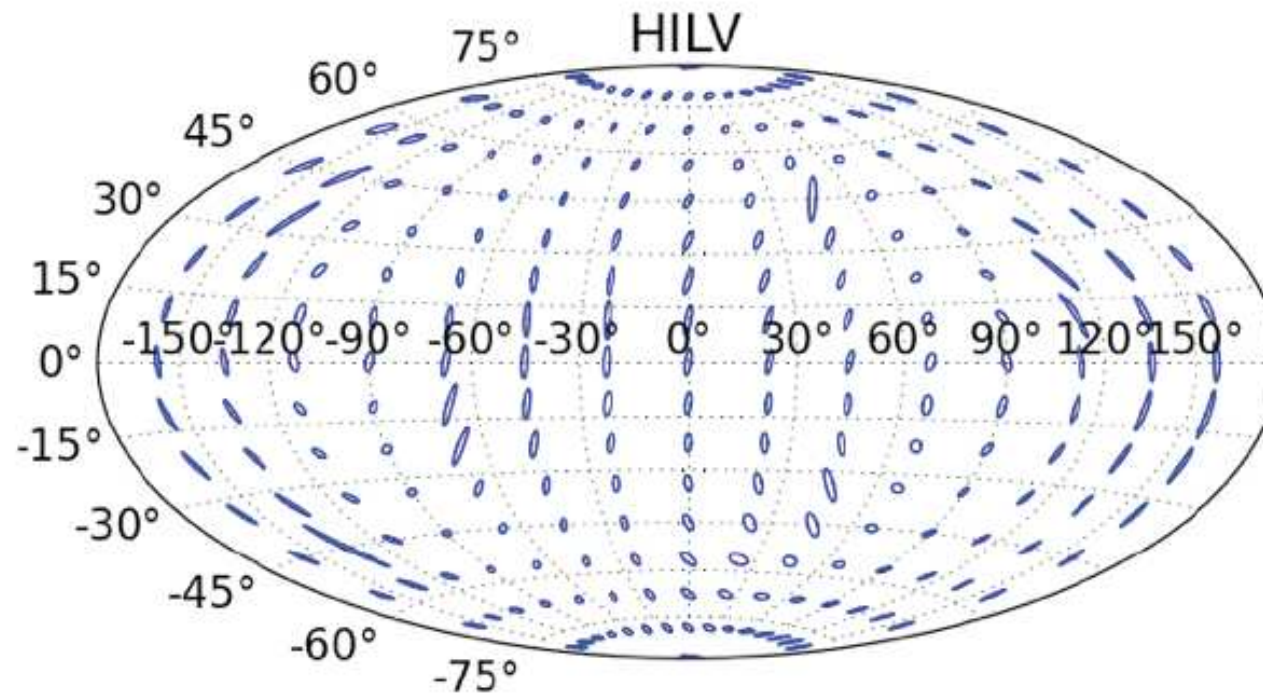


Lokalizacja kluczowa, żeby móc poszukiwać innych sygnałów...

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Położenie

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



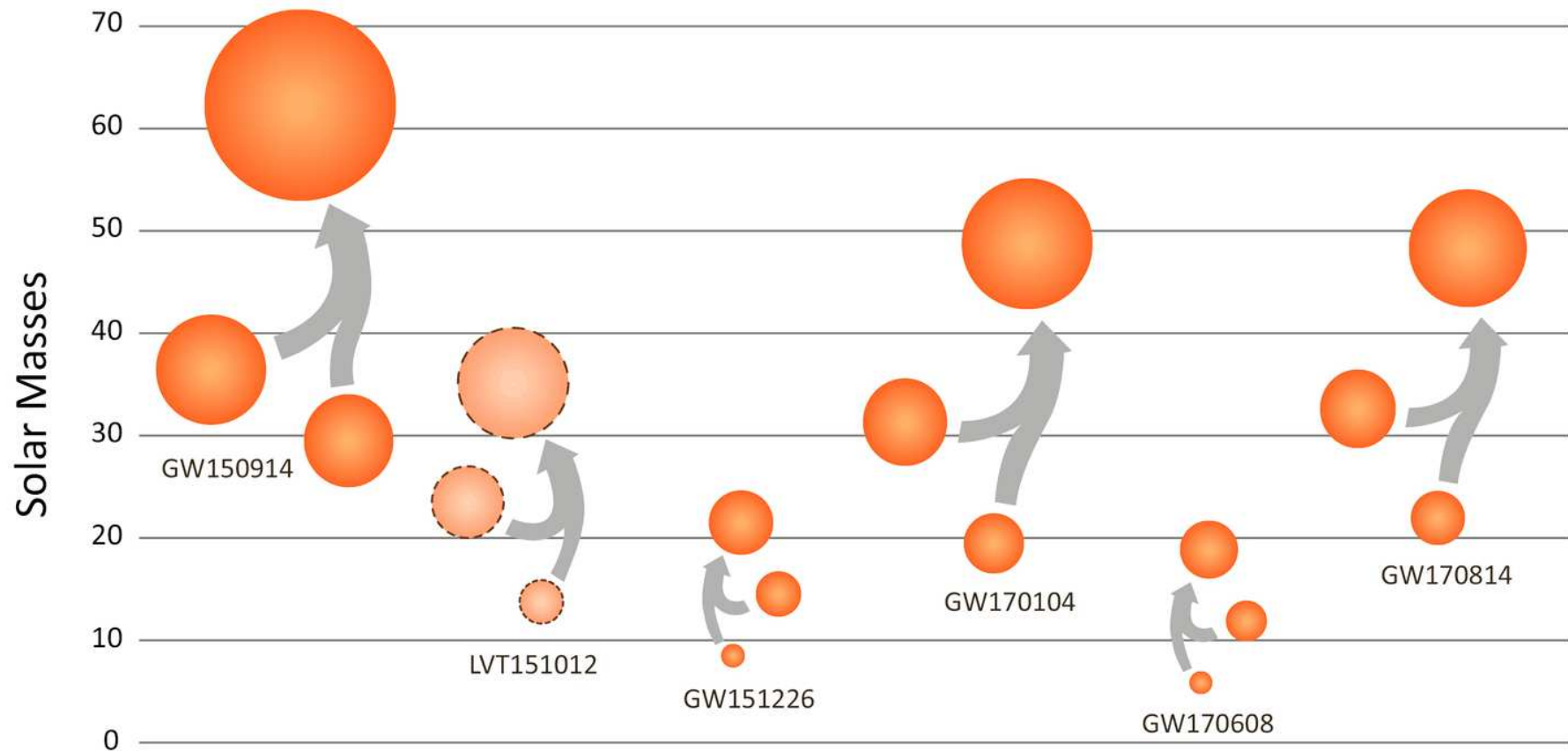
Fairhurst 2011

⇒ astronomia fal grawitacyjnych

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Black hole mergers

wyniki z okresów O1 i O2

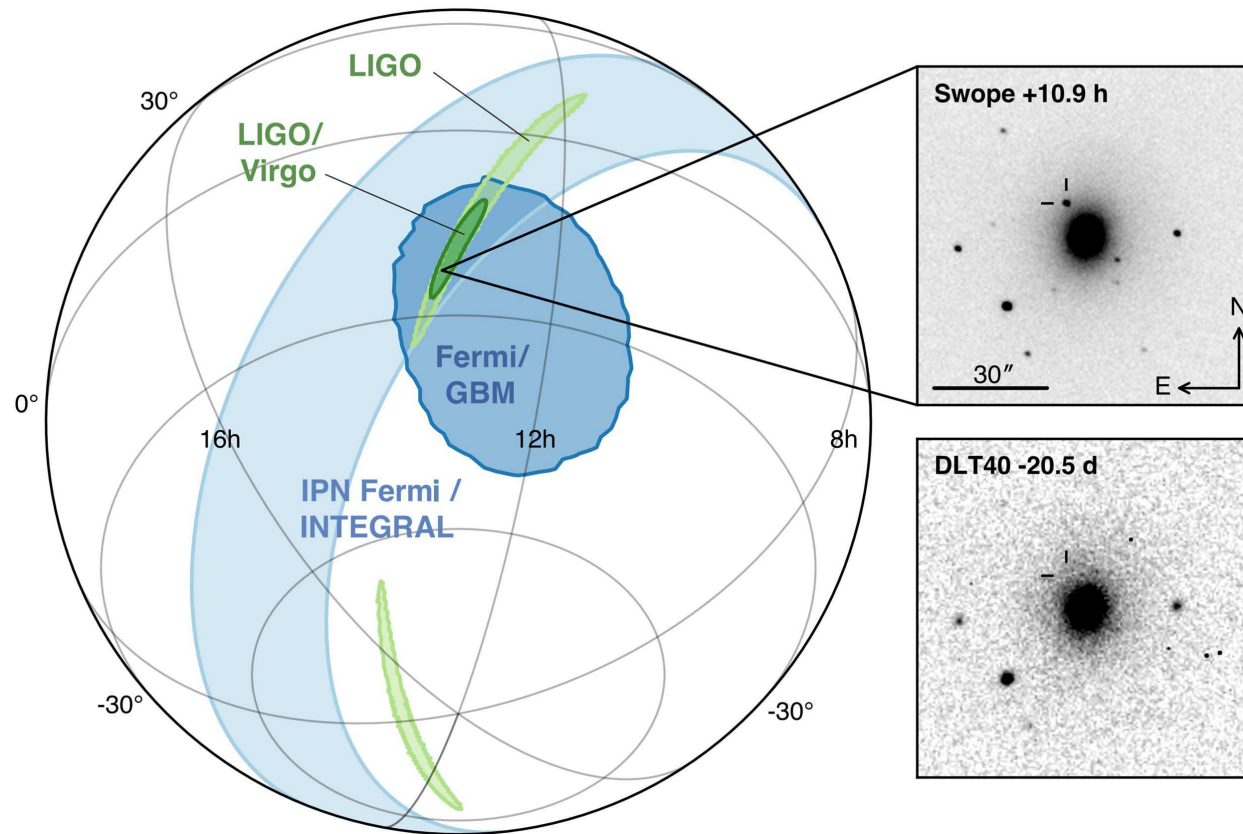


Łącznie zarejestrowano 6 przypadków złania się czarnych dziur...

# GW170817

## Wyjątkowy przypadek

LIGO i Virgo działały razem tylko przez miesiąc. Ale udało się zaobserwować jeszcze jeden impuls fal grawitacyjnych. **Zobaczyły go także inne eksperymenty !...**

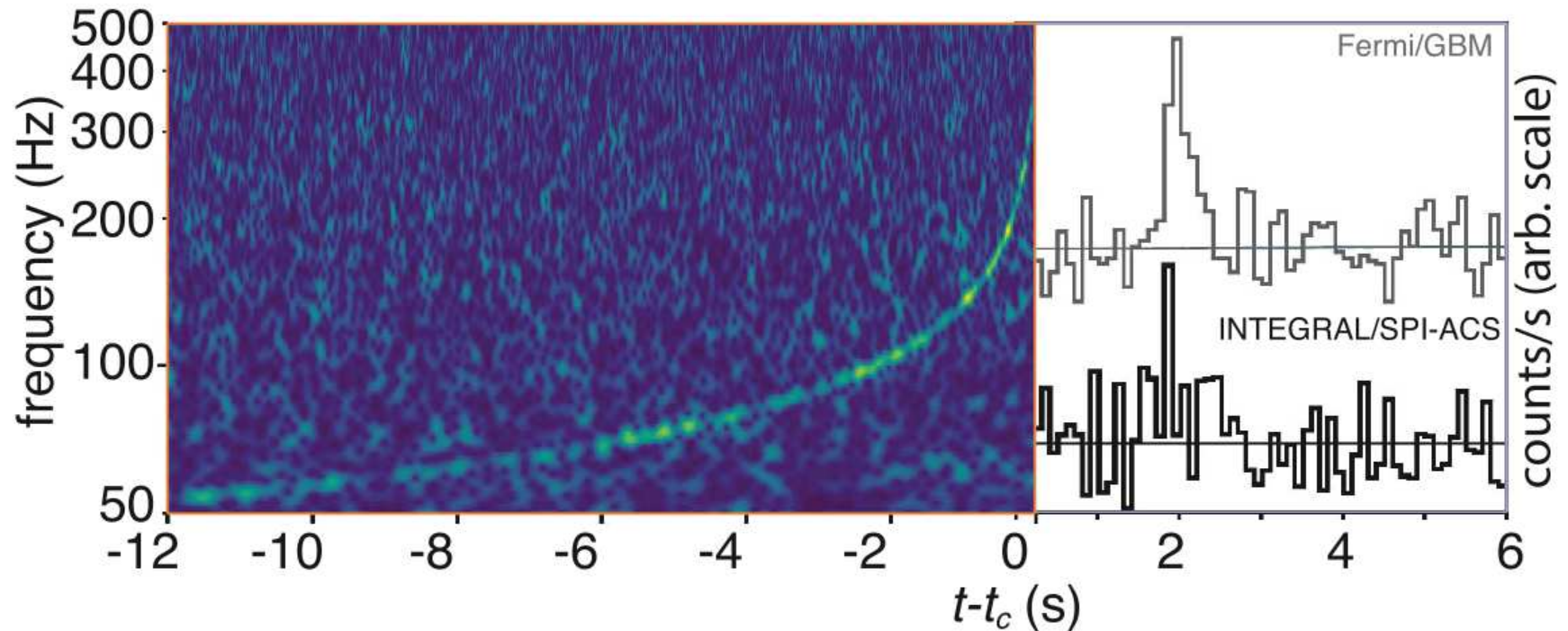


**W lokalizacji zgodnej z pozycją źródła zaobserwowano wybuch supernowej!**

# GW170817

## Identyfikacja źródła

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



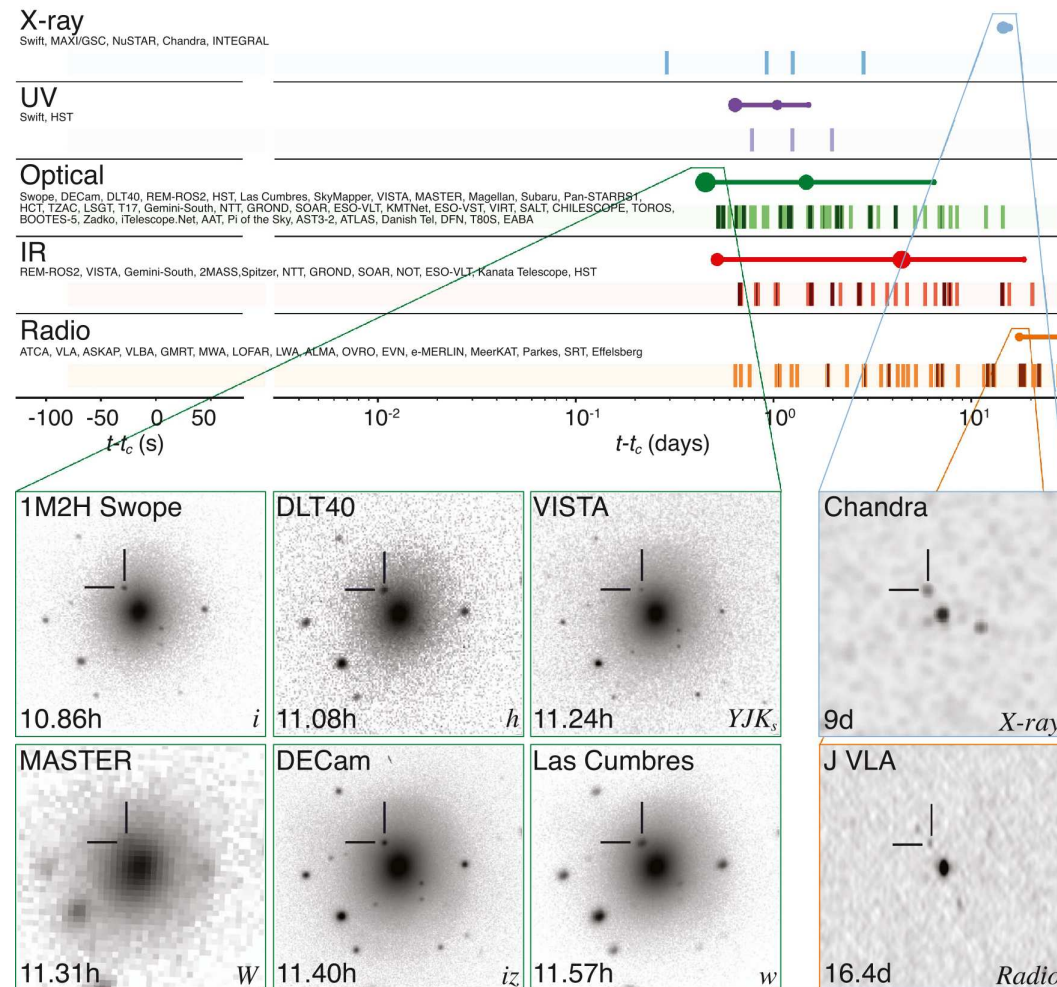
Potwierdzenie hipotezy dotyczącej pochodzenia krótkich błysków gamma



# GW170817

## Dalsze obserwacje

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

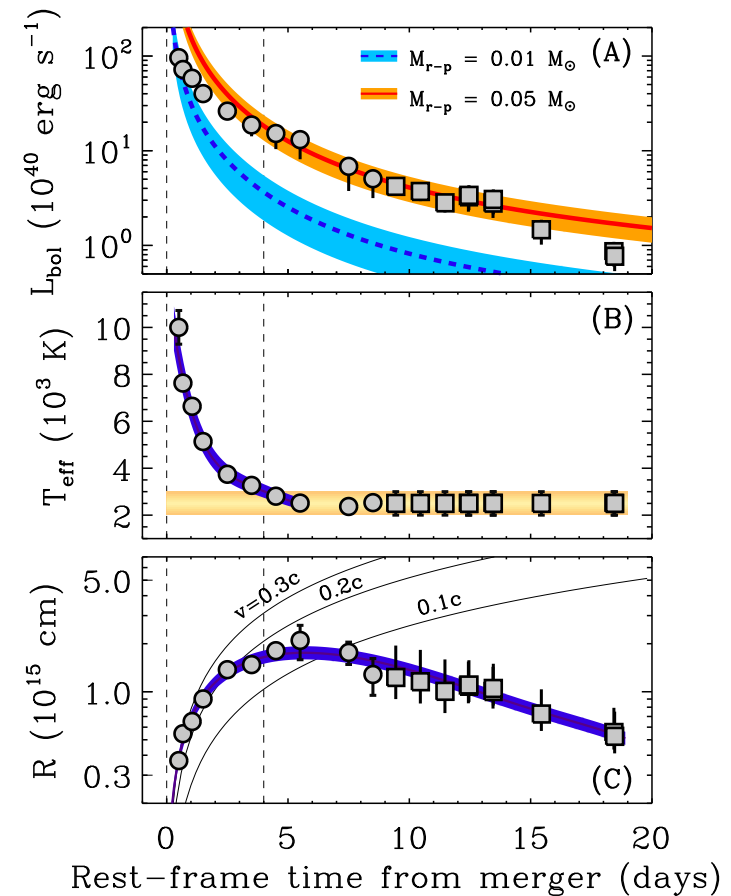
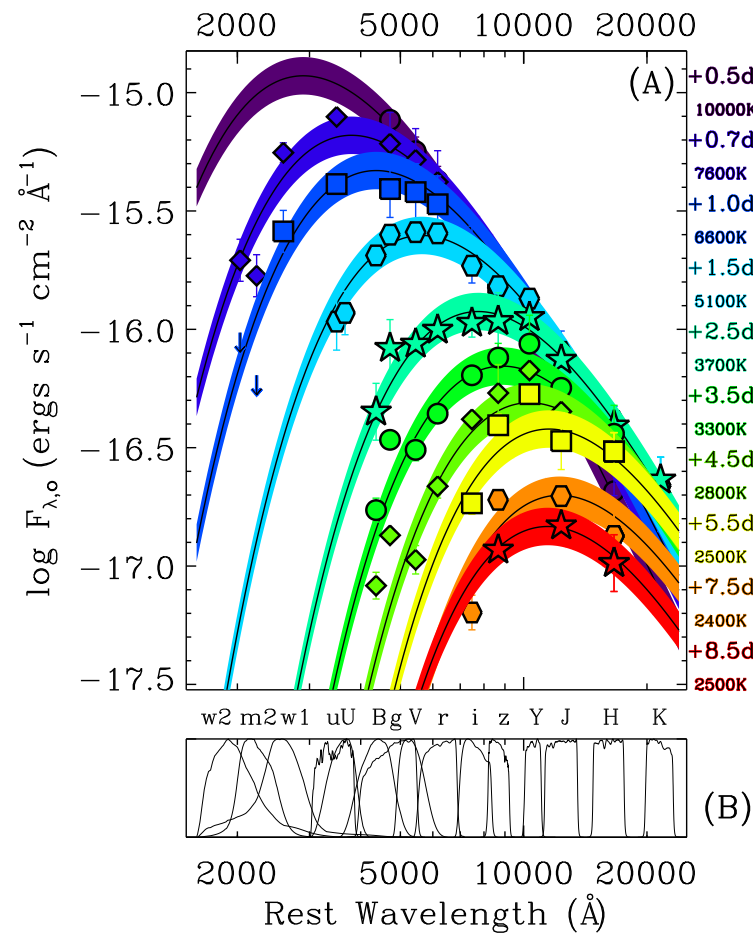


później także sygnał w prom. rentgenowskim i radiowy...

# 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.

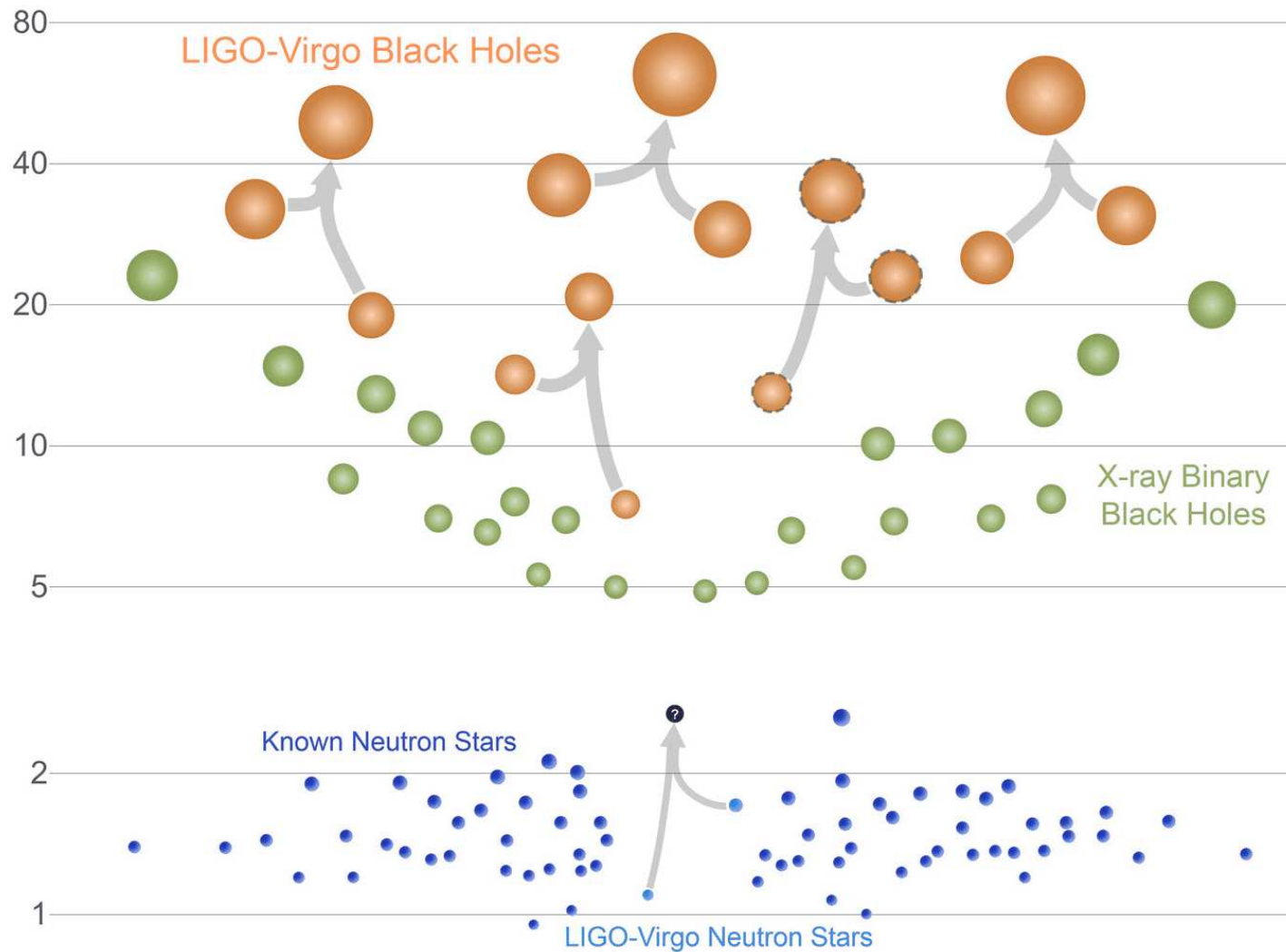
**W ilości wystarczającej do wytłumaczenia ich zawartości we Wszechświecie...**

**Potwierdziliśmy też przewidywania Ogólnej Teorii Względności:**

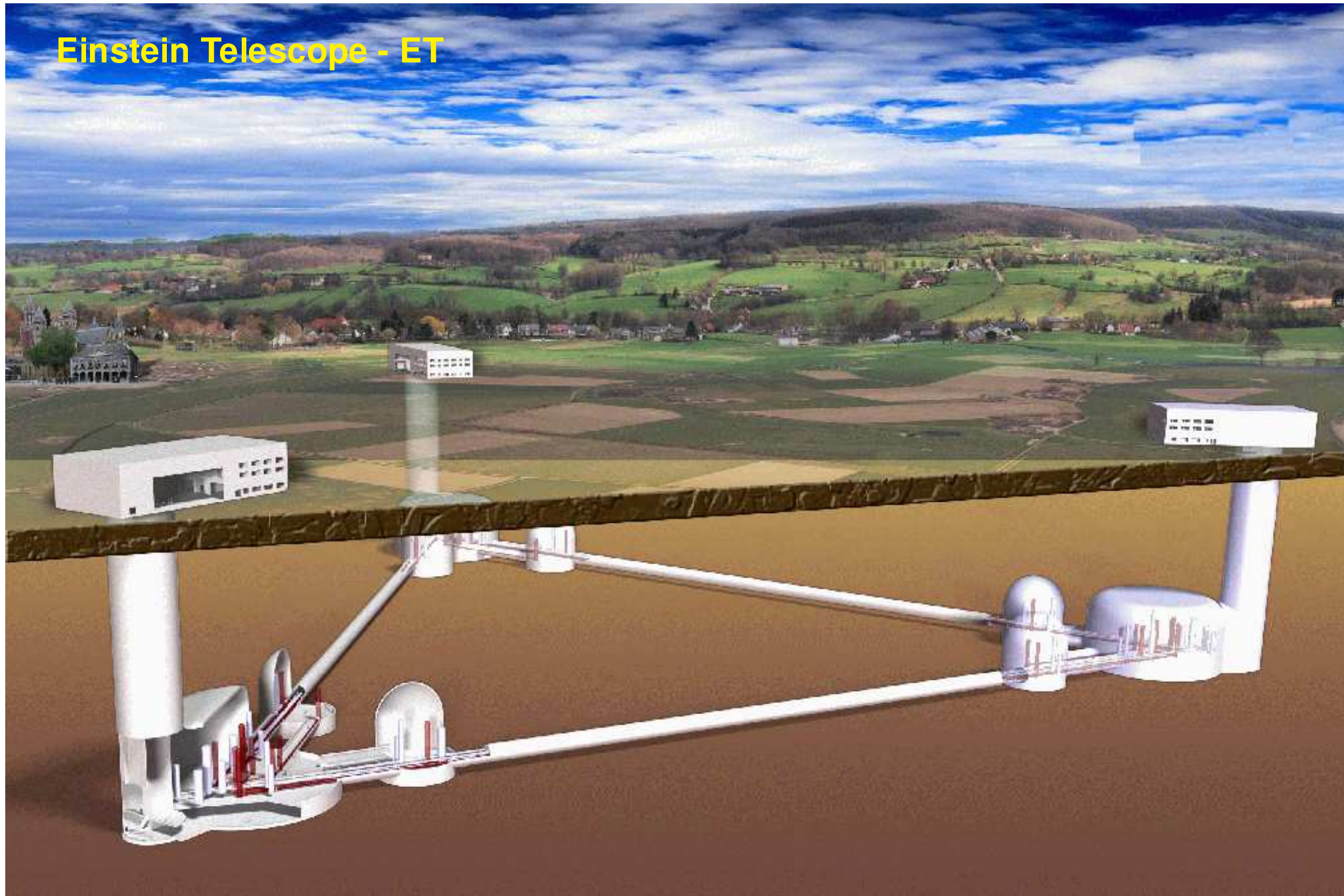
**Prędkość fal grawitacyjnych jest równa prędkości światła z dokładnością rzędu  $10^{-15}$ ...**

# Detekcja fal grawitacyjnych

## Widmo mas źródeł

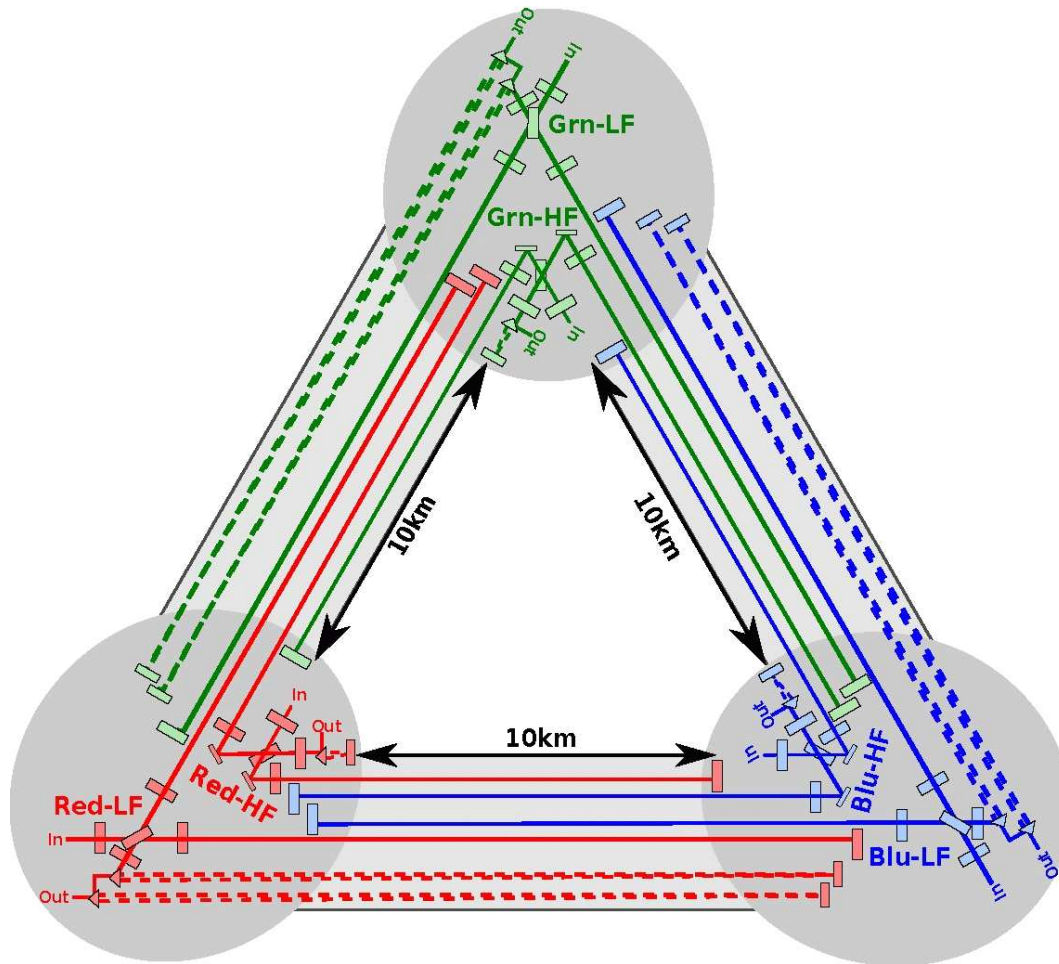


# Einstein Telescope - ET



# 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.

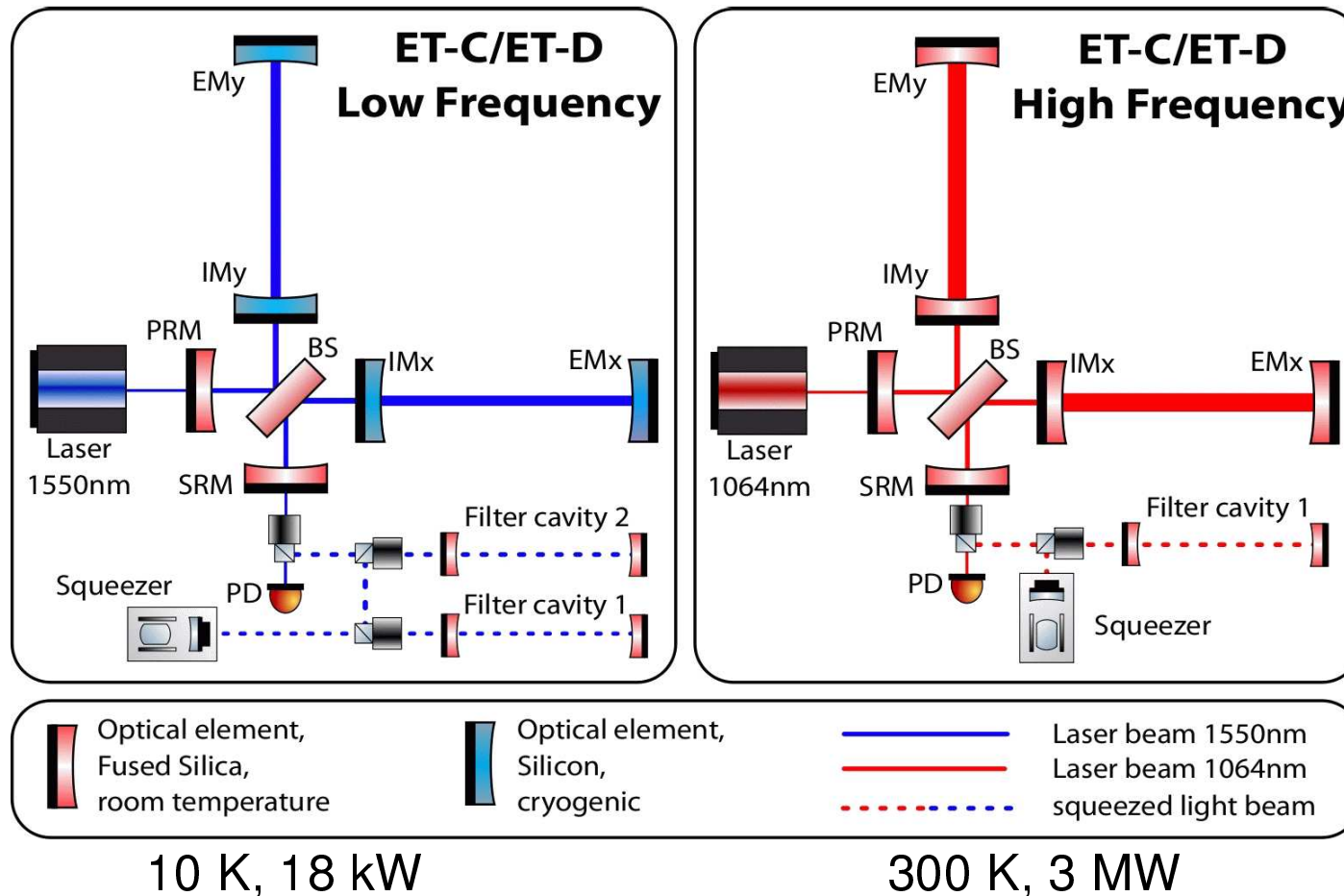
Decyzja o finansowaniu powinna zapaść w ciągu kilku najbliższych lat.

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

# Przyszłe eksperymenty

## Einstein Telescope

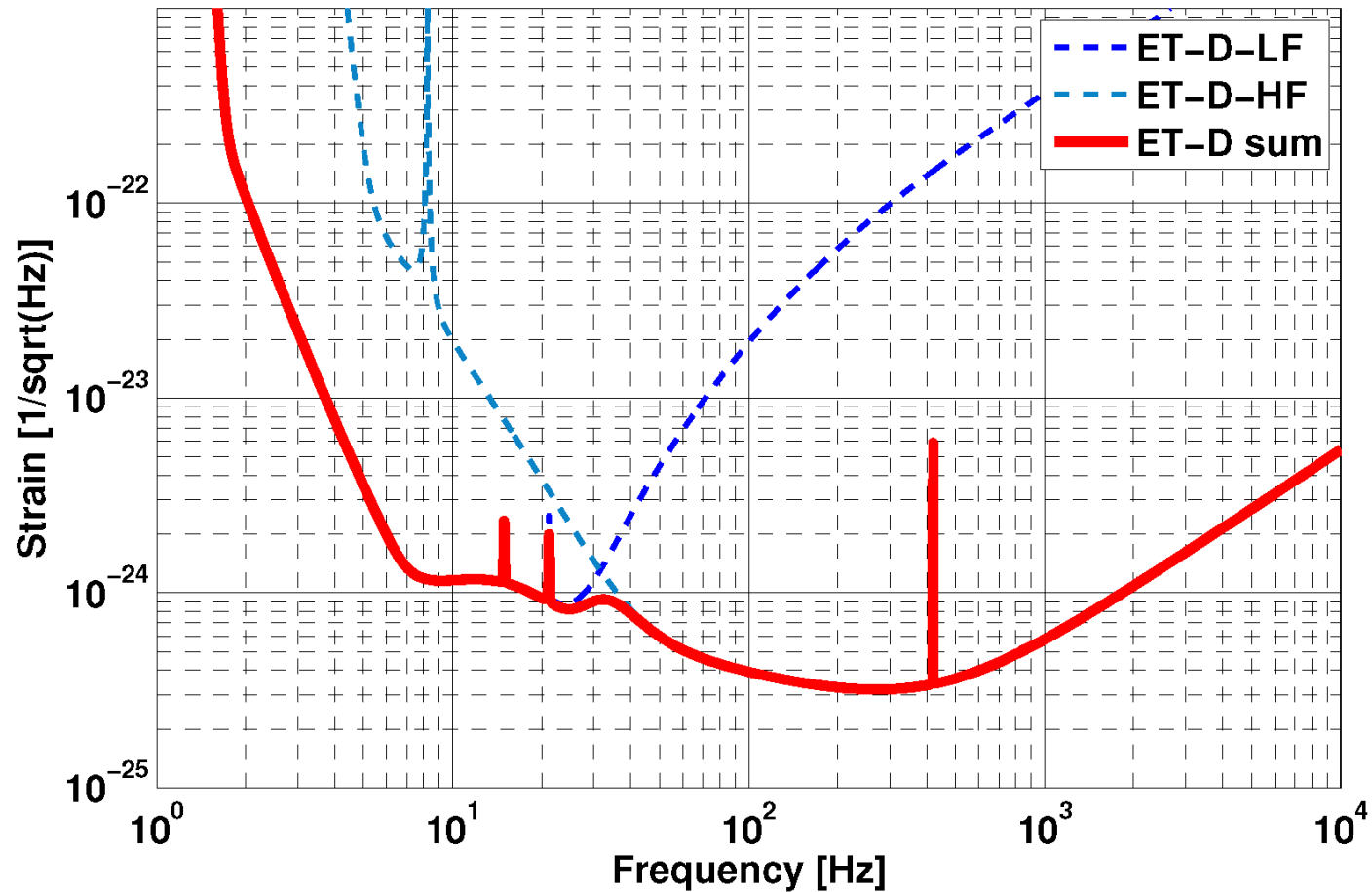
Aby zwiększyć czułość urządzenia zakłada się budowę w każdym wierzchołku dwóch niezależnych interferometrów:



# Przyszłe eksperymenty

## Einstein Telescope

Oczekiwana czułość całego urządzenia:



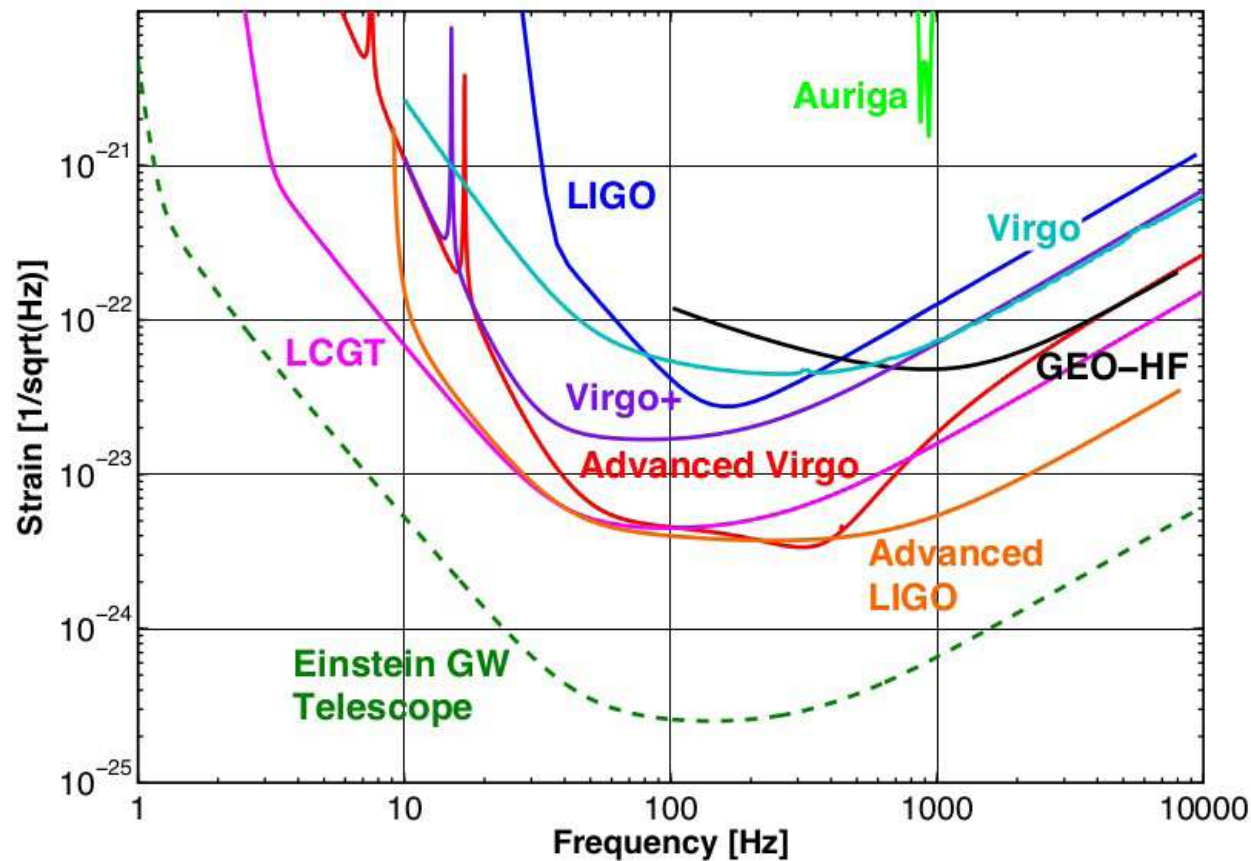


# Przyszłe eksperymenty

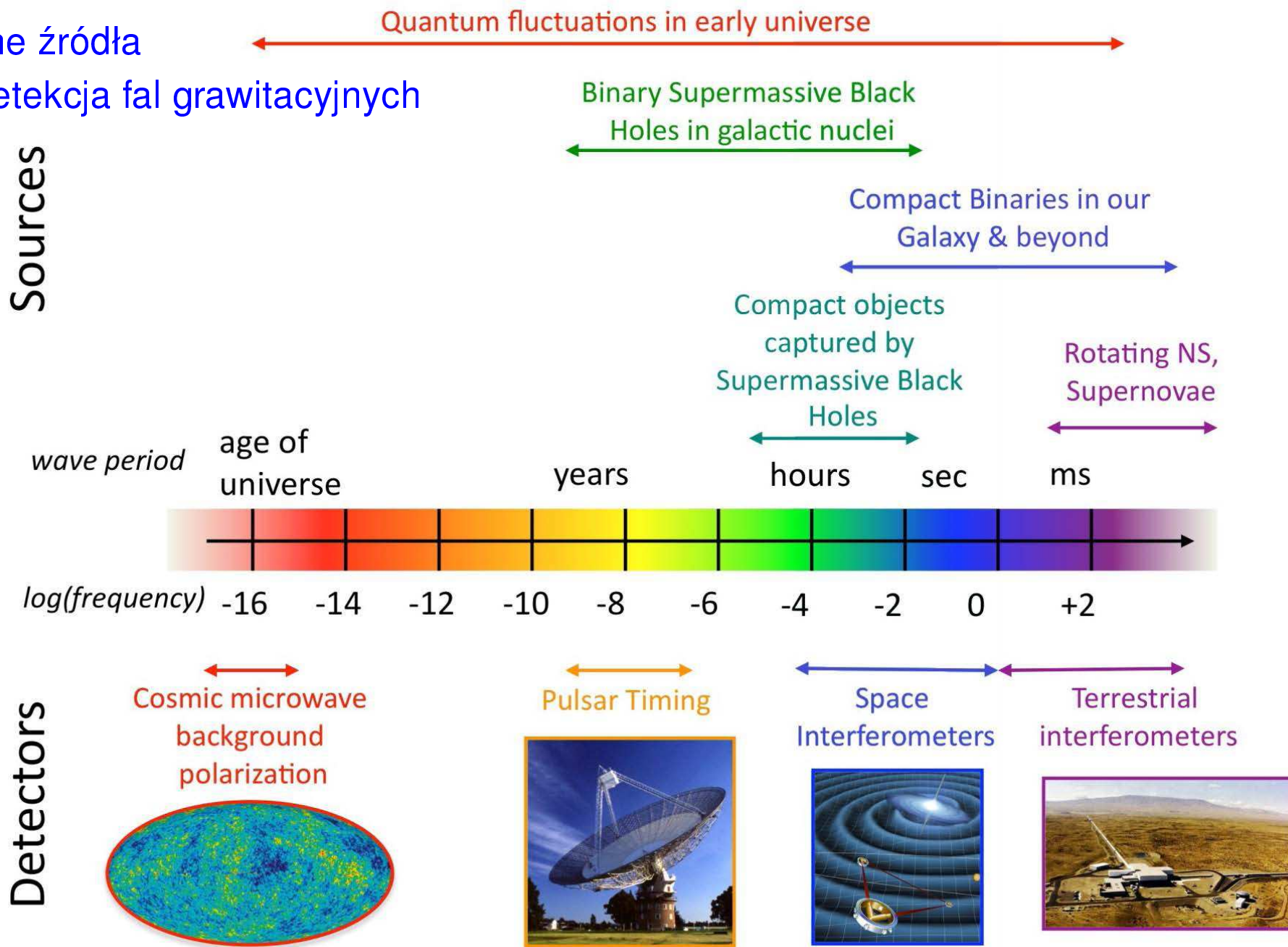
## Einstein Telescope

Czułość o rząd wielkości większa niż Advanced LIGO + Virgo

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



# Potencjalne źródła widmo i detekcja fal grawitacyjnych

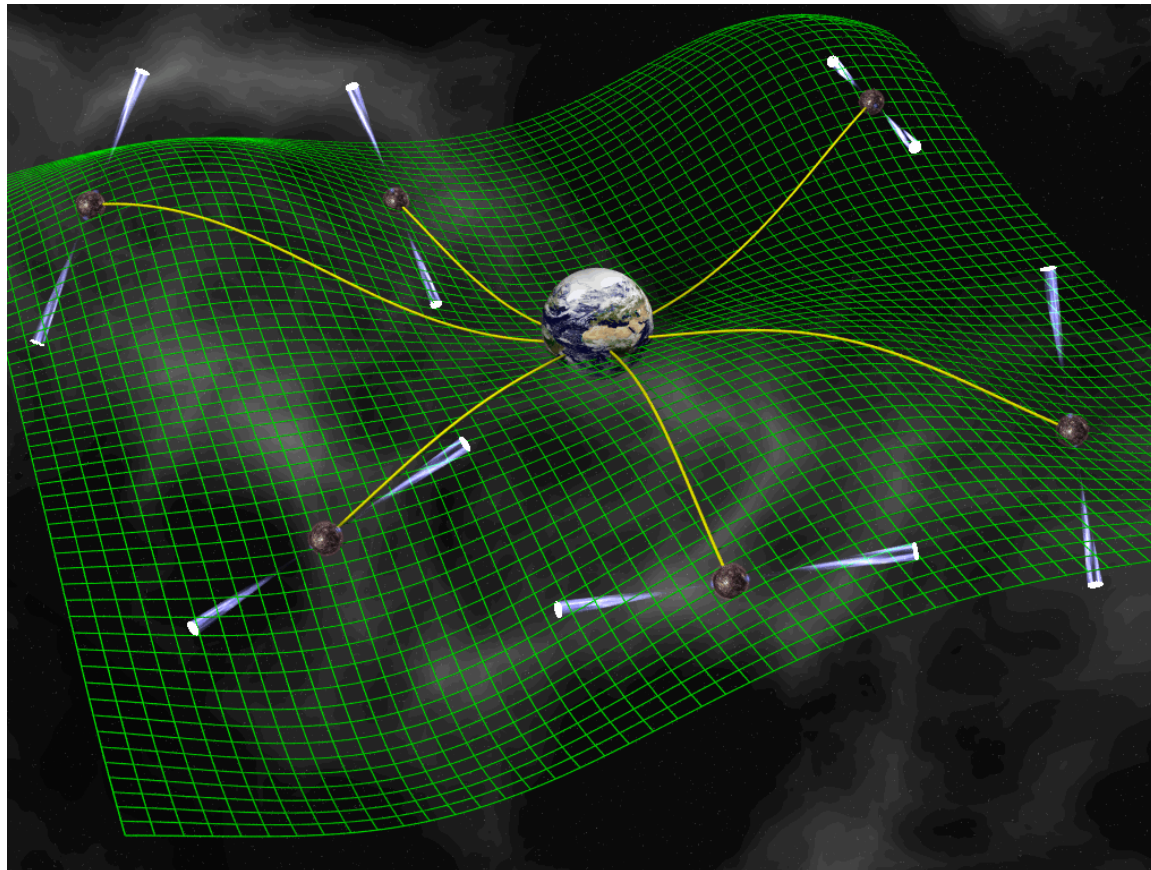


# Detekcja fal grawitacyjnych

## 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

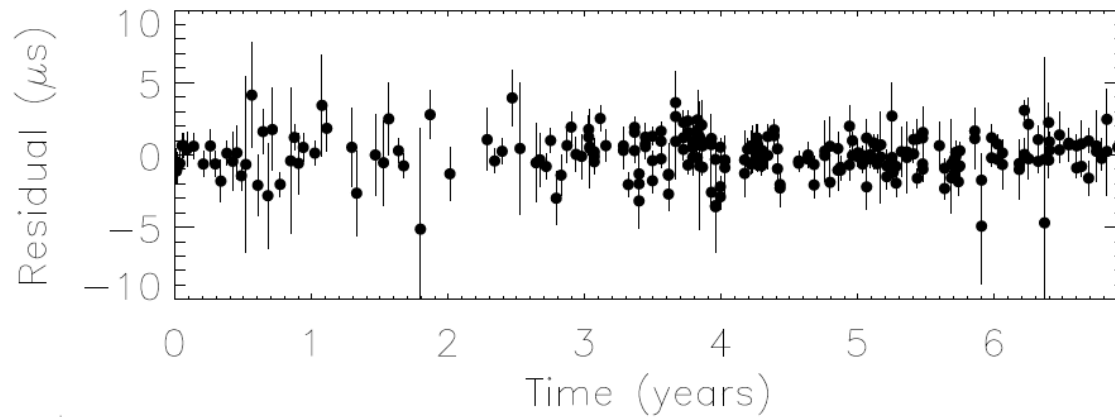
## Obserwacja odległych pulsarów

International Pulsar Timing Array - monitorowanie wybranych pulsarów

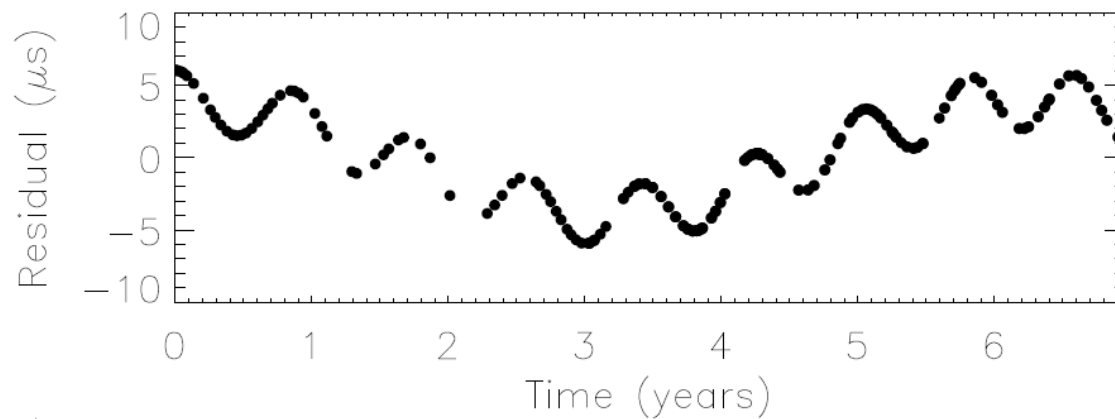


# Detekcja fal grawitacyjnych

## Obserwacja odległych pulsarów



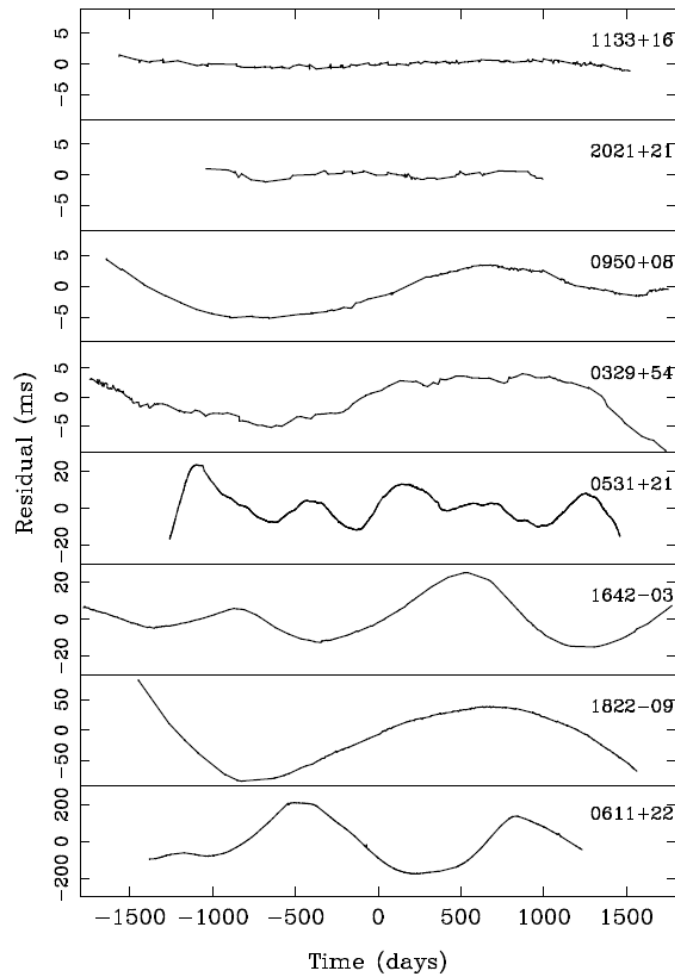
Obserwowane odchylenia okresu pulsara PSR B1855+09



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

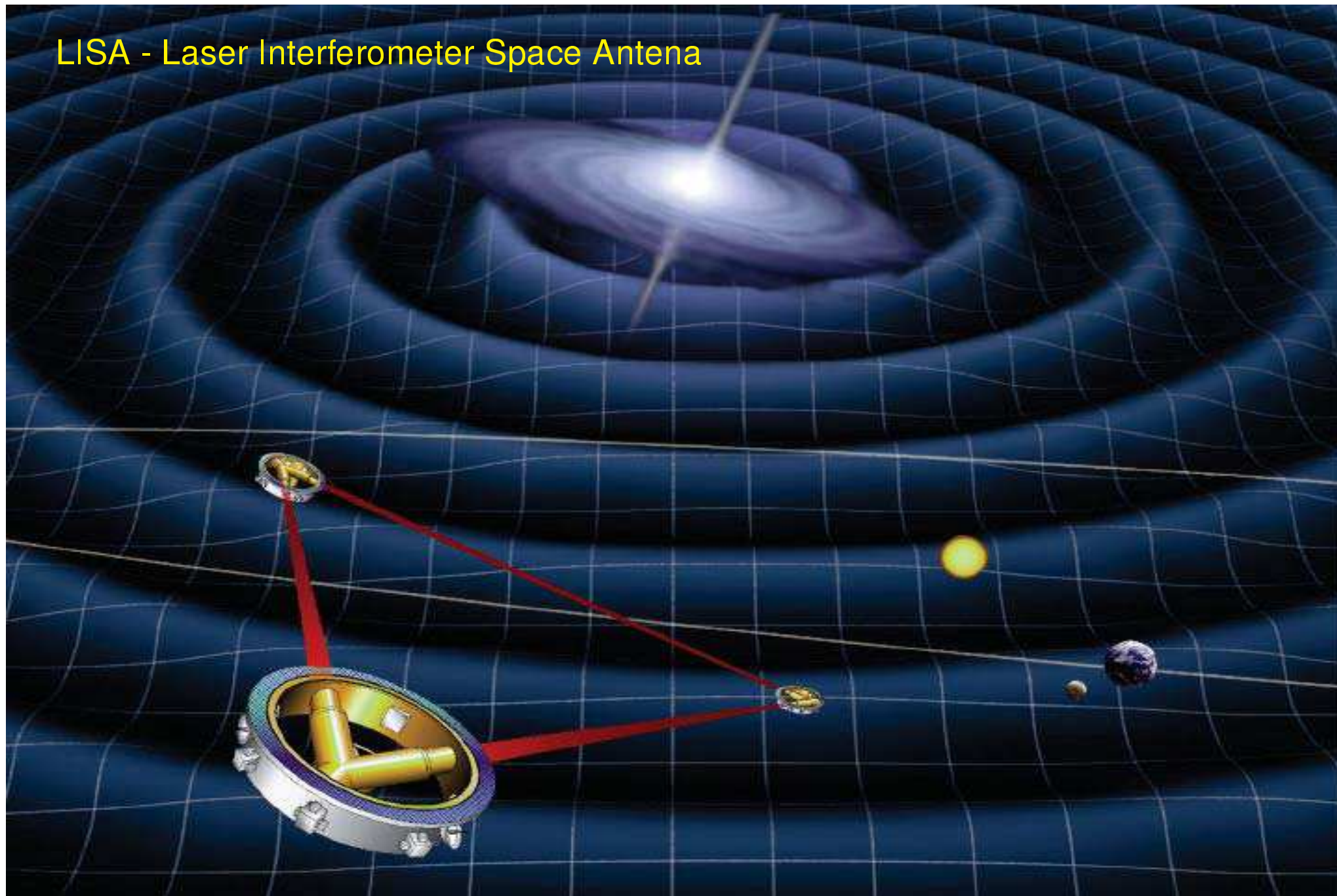
Projekt NASA+ESA rozwijany od lat 1990.

Trzy stacje satelitarne w układzie trójkąta o boku 5 mln. km, na orbicie Słonecznej  $20^\circ$  za Ziemią.

Przewidziany przez ESA do wystrzelenia w  $\sim$ 2018.

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

# LISA - Laser Interferometer Space Antenna



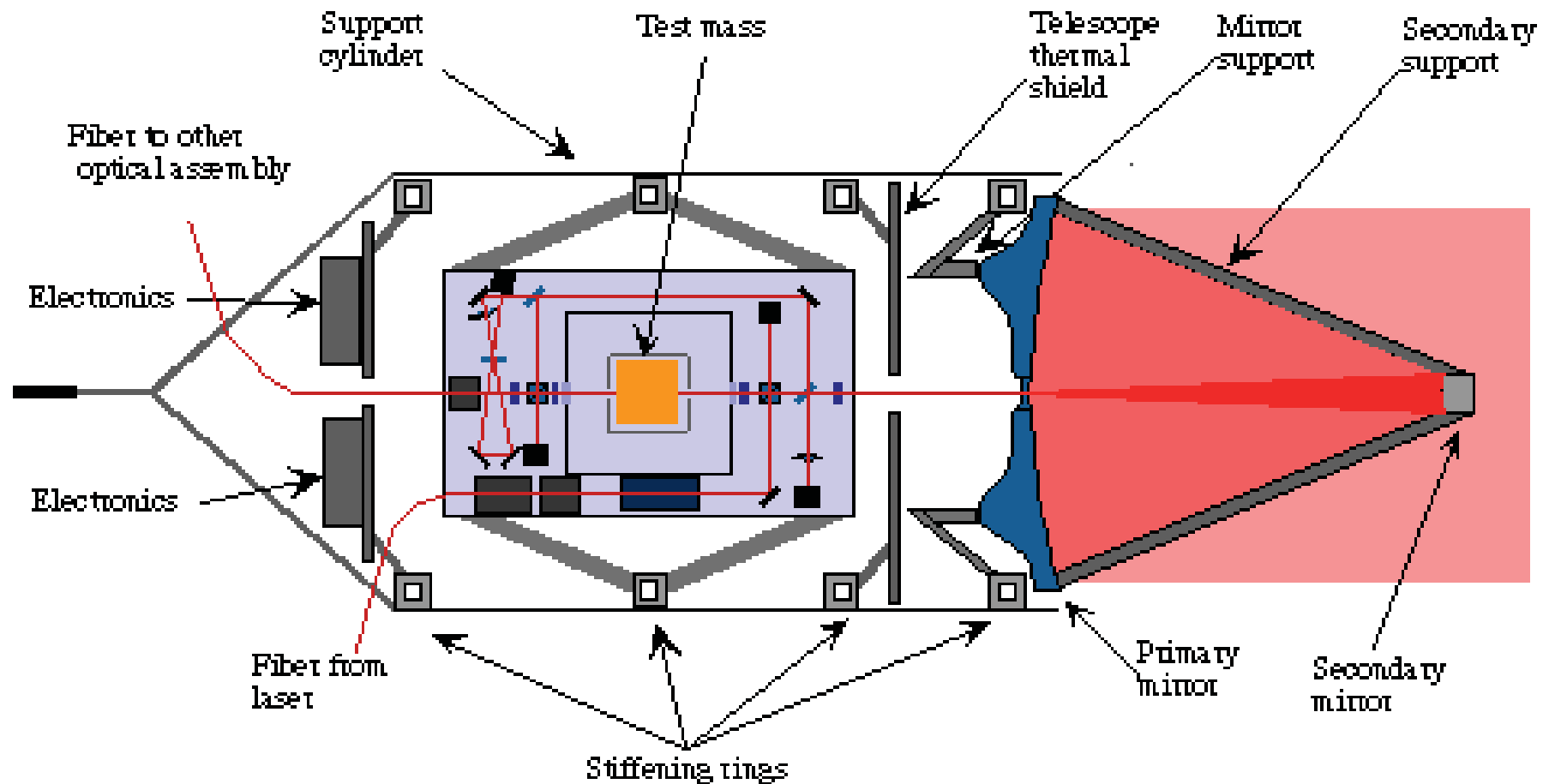


# Przyszłe eksperymenty

## LISA

Schemat pojedynczego modułu pomiarowego detektora LISA.

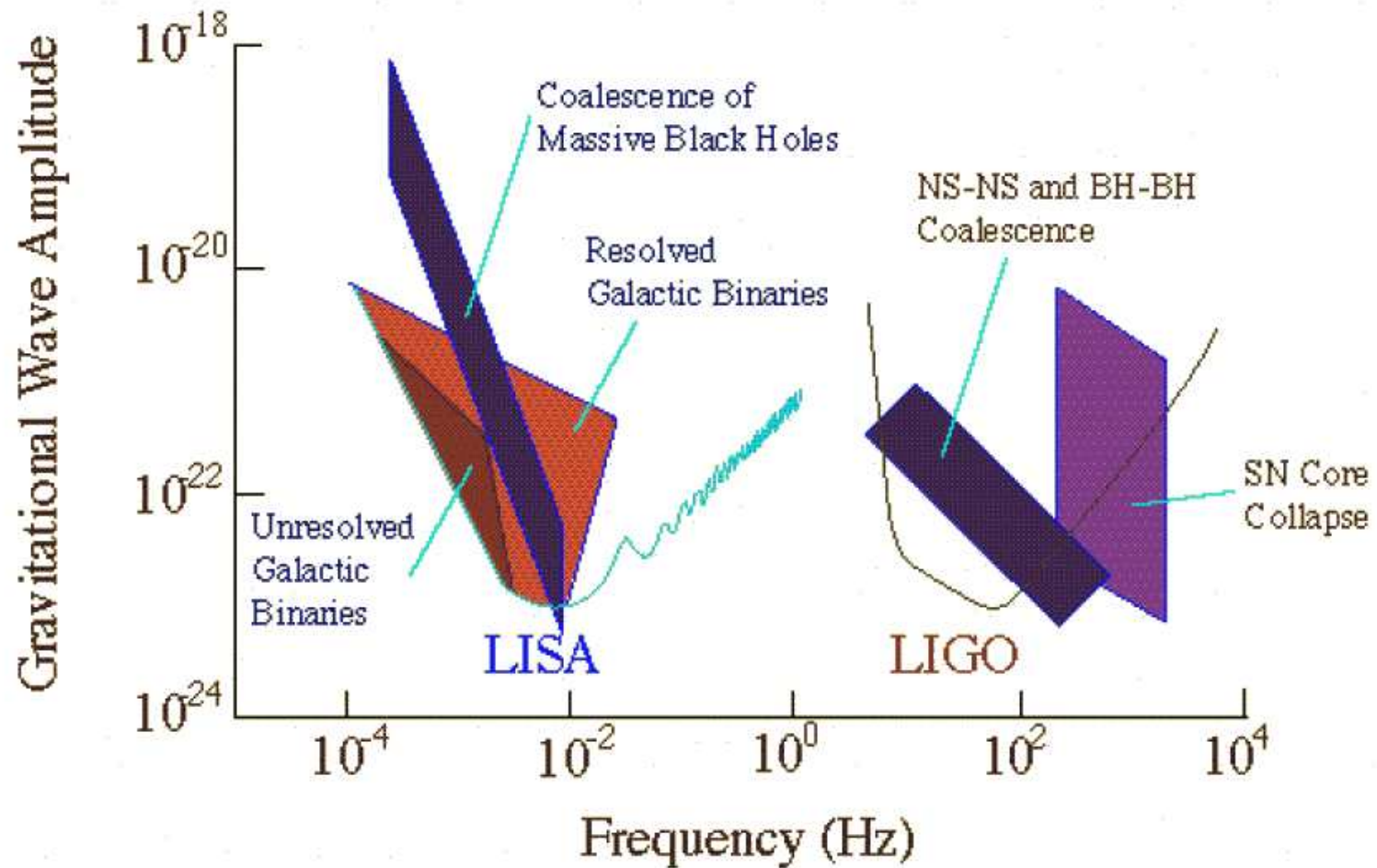
Interferometr mierzy odległość między całkowicie odizolowanymi “masami testowymi”



# Przyszłe eksperymenty

## LISA

Oczekiwana czułość i zakres częstotliwości w projekcie LISA



## Przyszłe eksperymenty

### eLISA

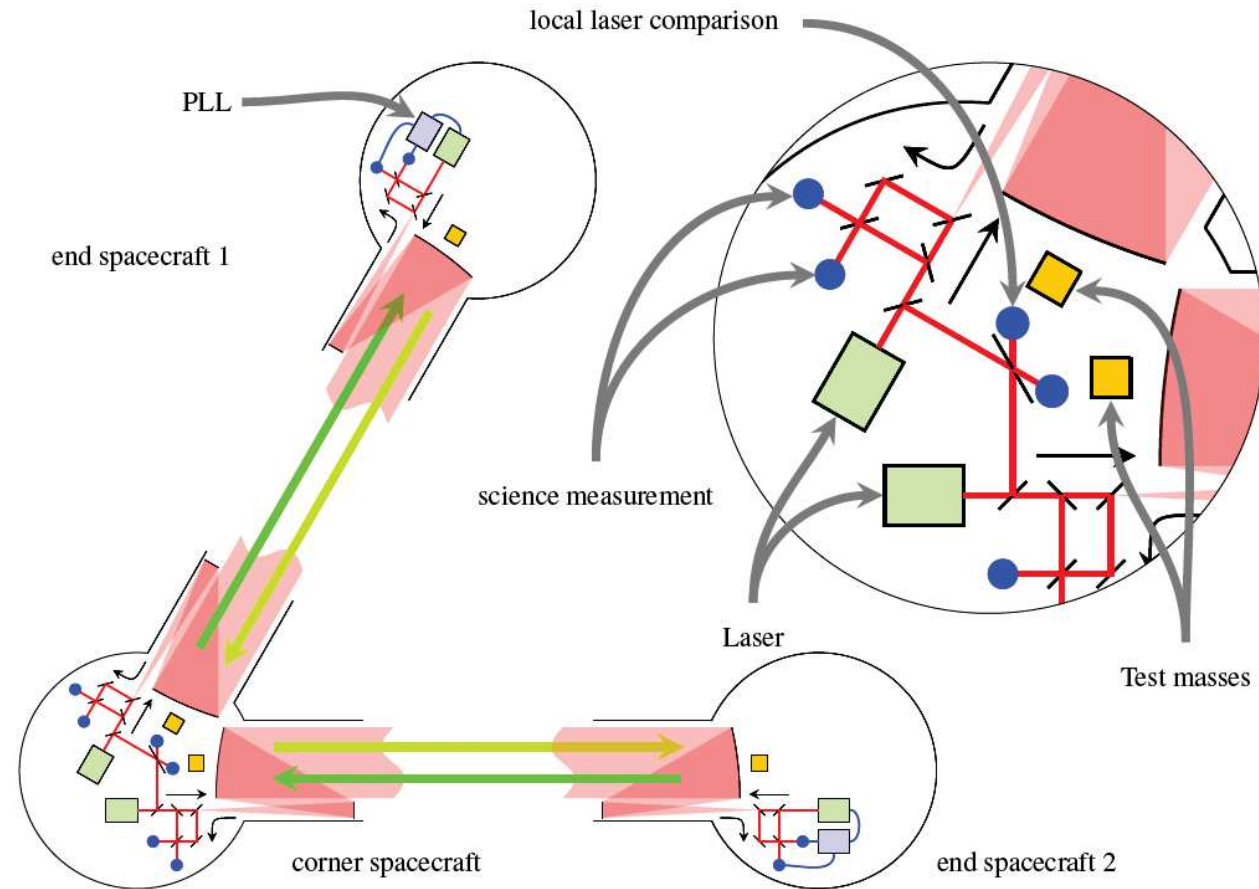
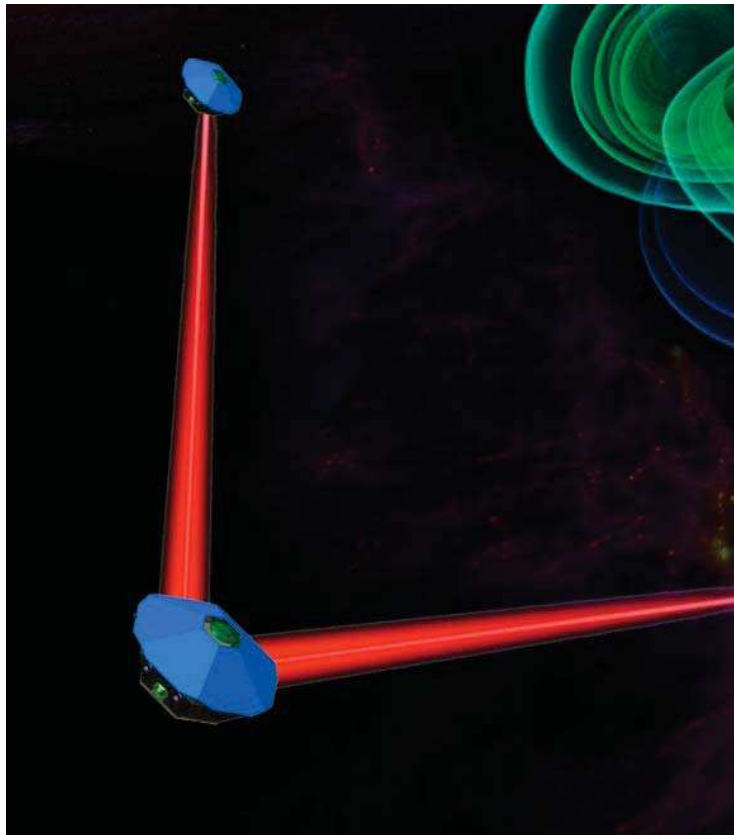
Po wycofaniu NASA projekt musiałby być przycięty do możliwości budżetowych ESA

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

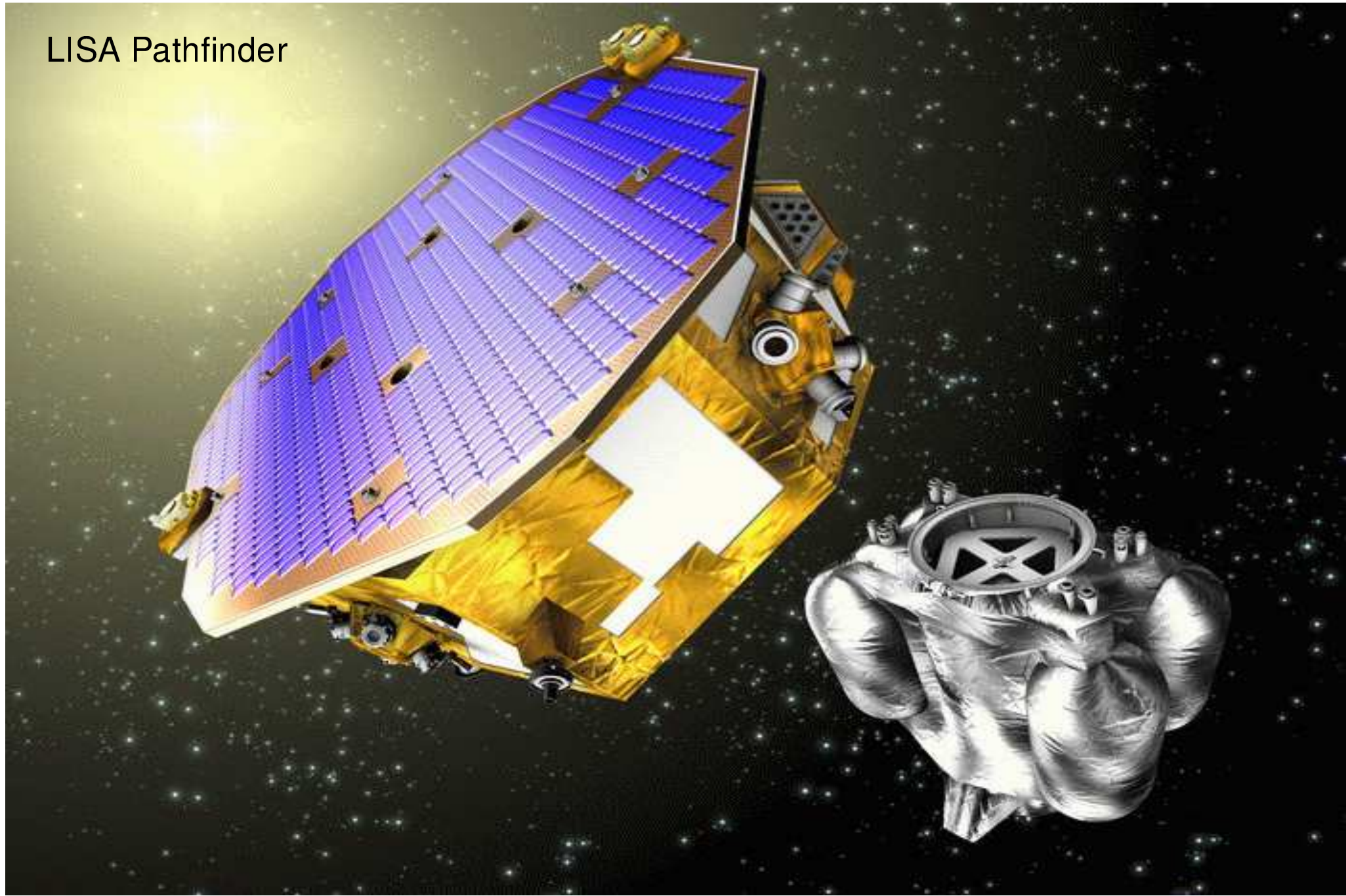
3 grudnia 2015 wystrzelony został próbnik testowy “LISA Pathfinder”, który miał przetestować kluczowe dla projektu podzespoły:

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

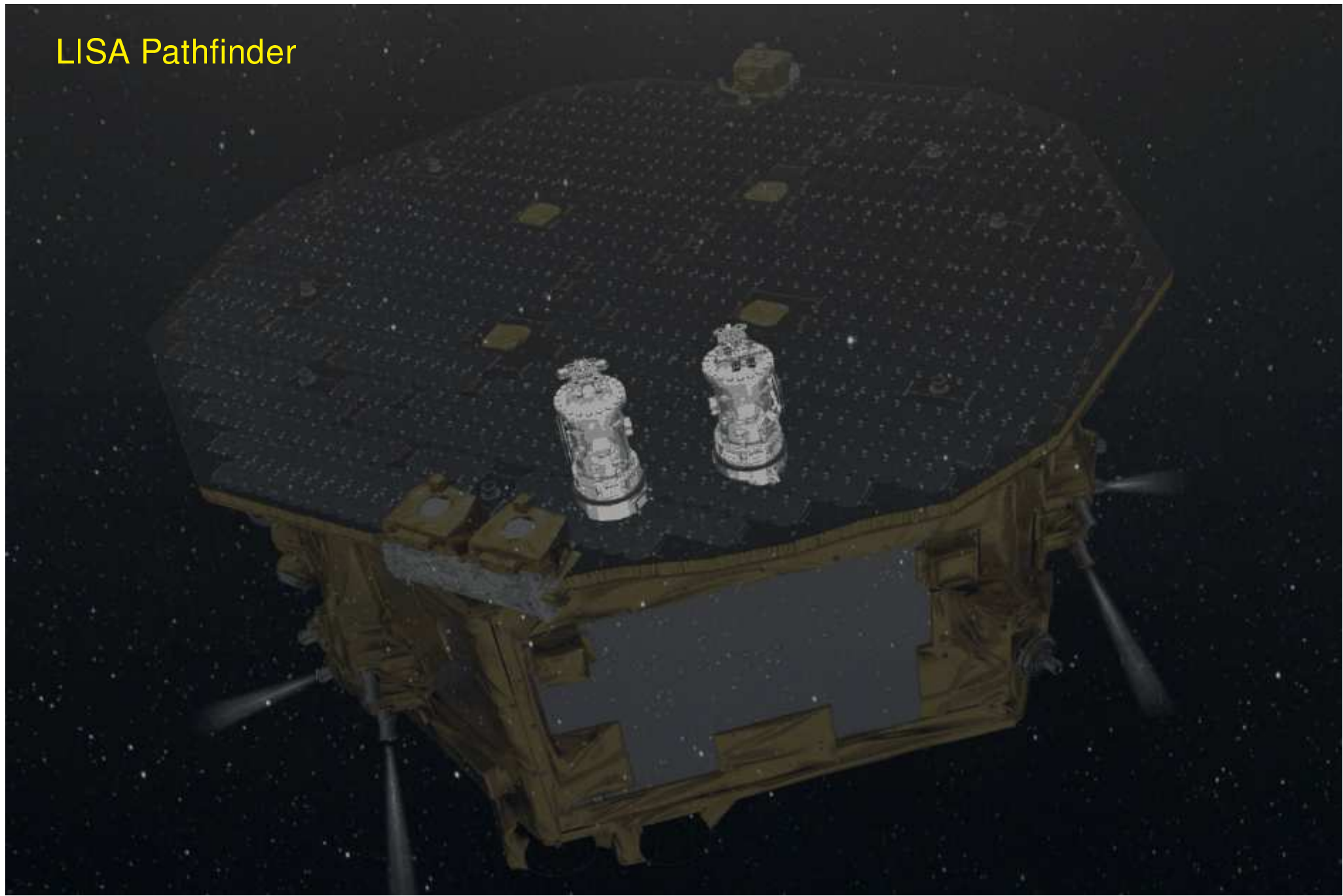
8 marca 2016 satelita rozpoczął pomiary w 1 punkcie Lagranga (LP1).

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

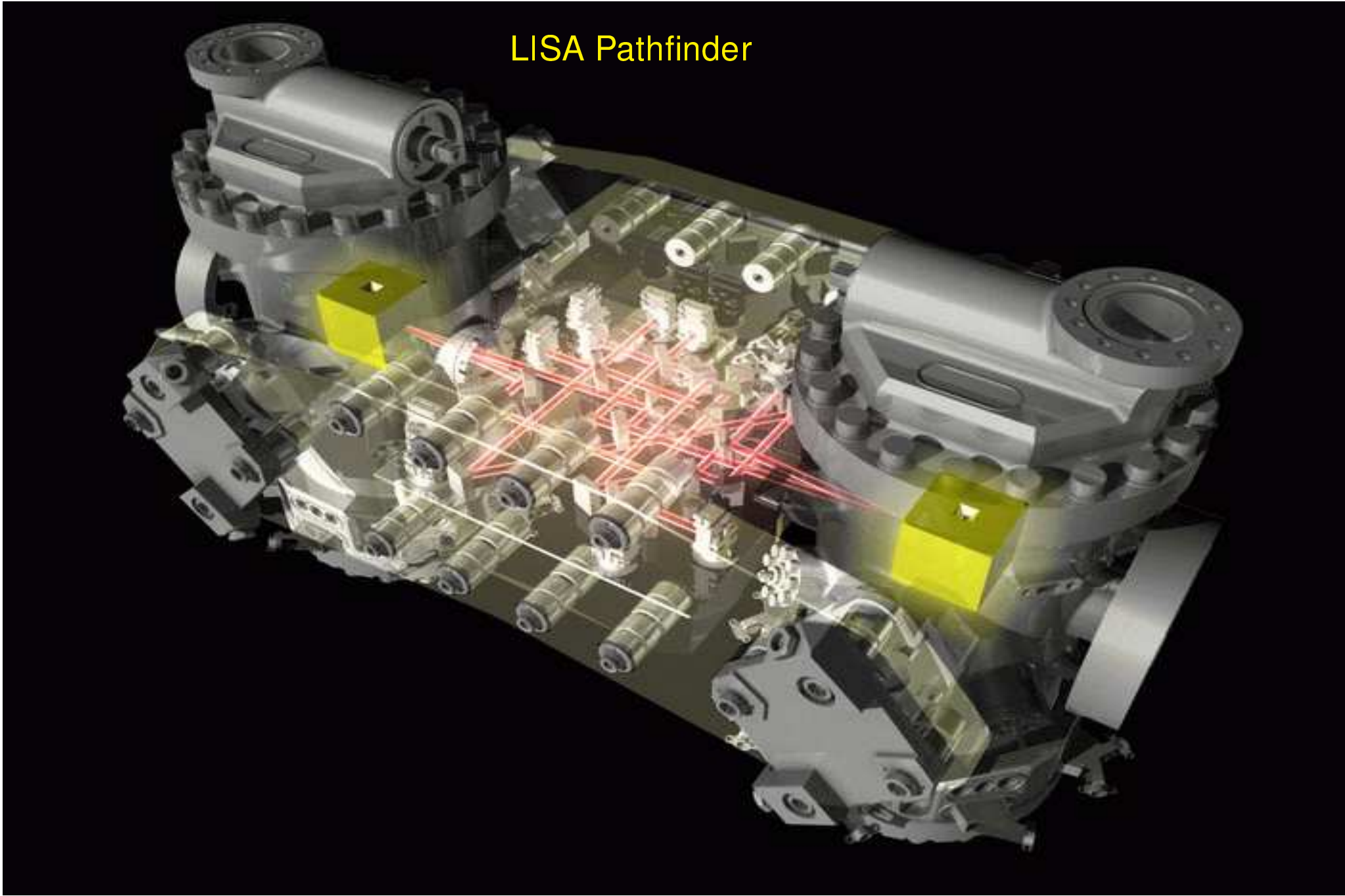
# LISA Pathfinder



# LISA Pathfinder



# LISA Pathfinder

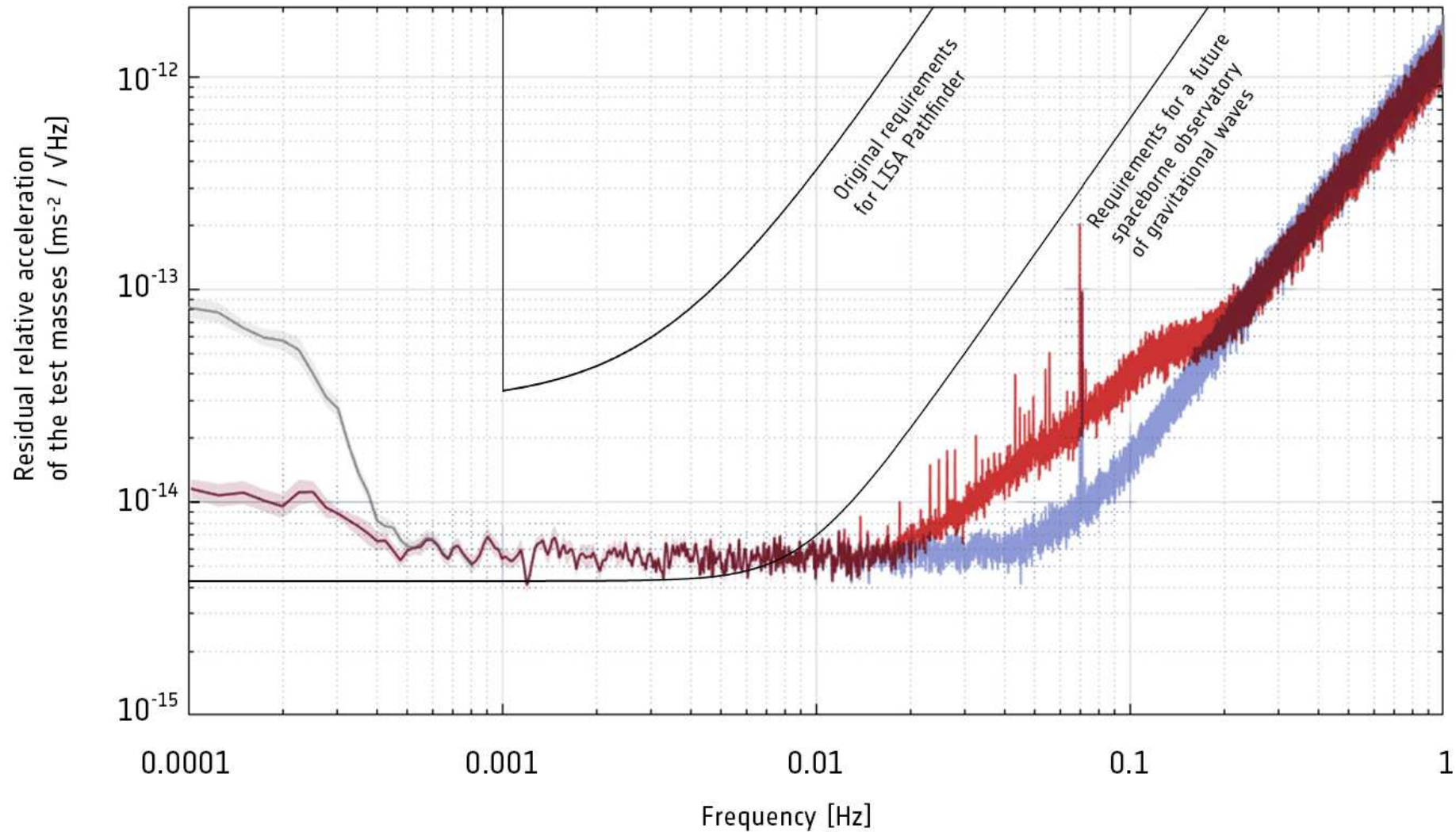




# LISA Pathfinder

## Wyniki

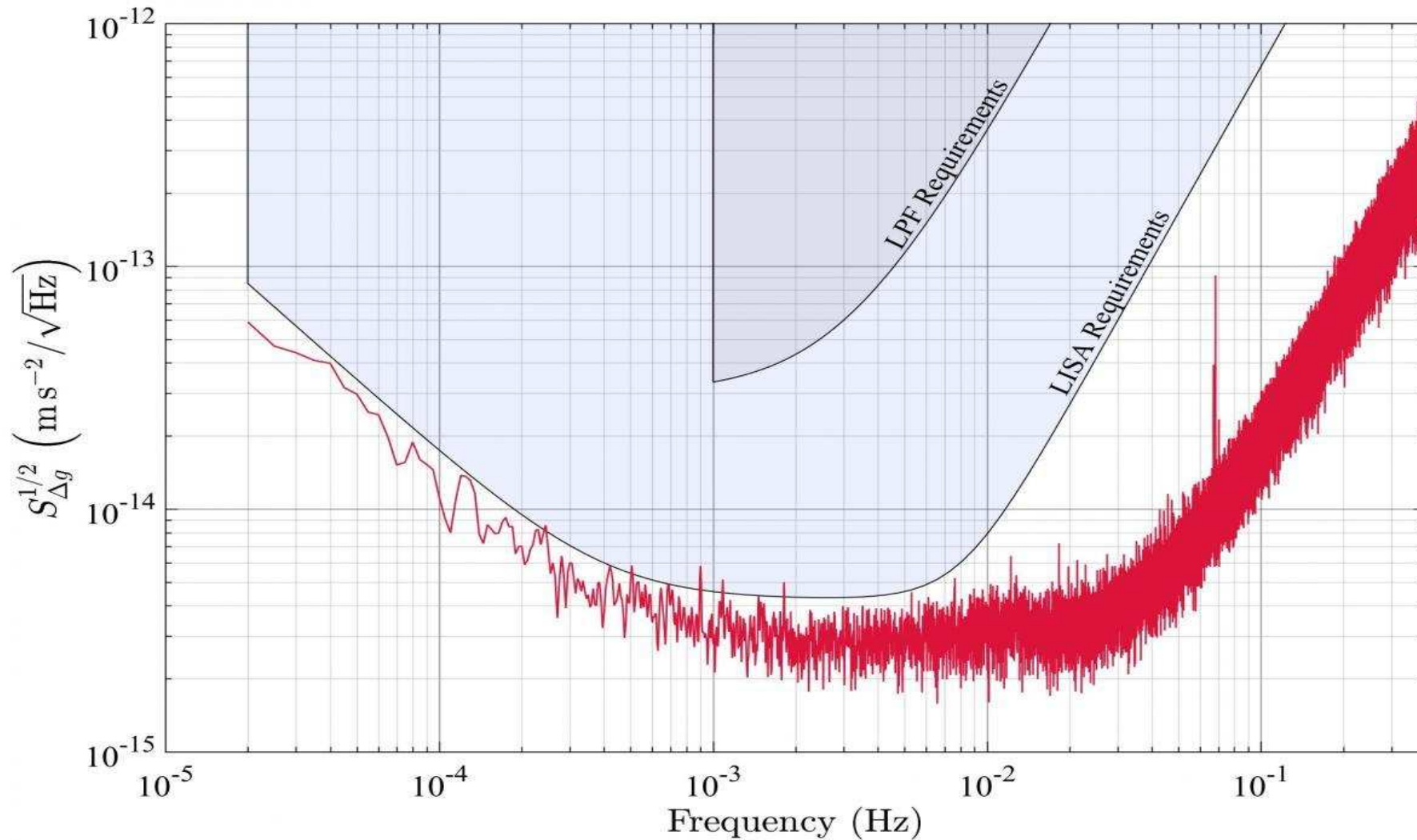
Pierwsze pomiary: 7 czerwca 2016



# LISA Pathfinder

Wyniki

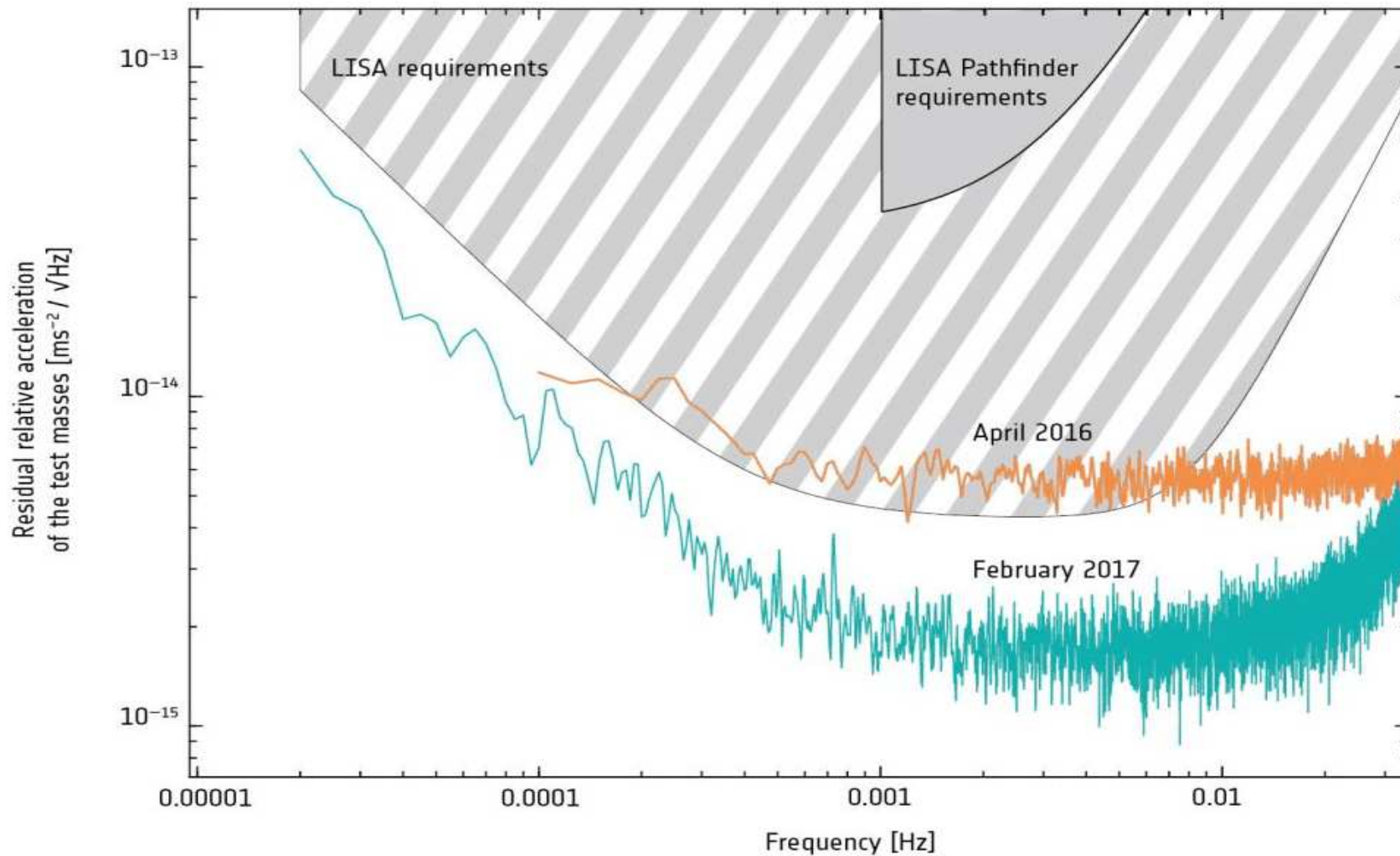
nowe wyniki: styczeń 2017



# 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  $40^\circ$  (na orbicie)
- LISAS - Laser Interferometer Space Antenna in Stereo  
Dwa układy LISA oddalone o  $40^\circ$  (na orbicie)
- BBO - Big Bang Observer (BBO)  
Cztery układy typu LISA - dwa nakładające się (“Gwiazda Dawida”), kolejne co  $60^\circ$

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