

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Fale grawitacyjne

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



26 stycznia 2021

Dwa “pierwsze” terminy **do wyboru**

- **30 stycznia 2021 (sobota)**, godz. 15:00-16:30, albo
- **2 lutego 2021 (wtorek)**, godz. 15:00-16:30.

## Informacje o egzaminie

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

## Zaliczenie

Warunkiem zaliczenia jest

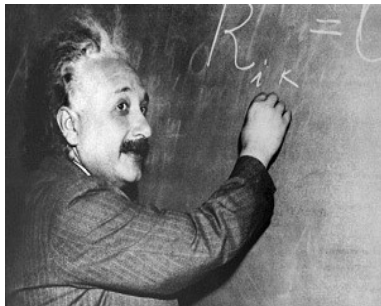
- Uzyskanie minimum **50% punktów** z testów
- Obecność na wykładzie  
więcej niż 2 **niesprawiedliwione** nieobecności  $\Rightarrow$  obniżona ocena

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

## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

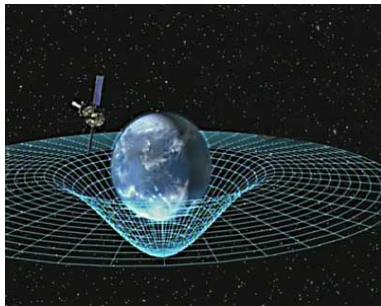
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



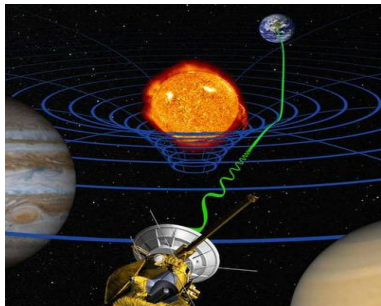
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

**Światło** porusza się po trajektoriach odpowiadających **najmniejszej odległości** (najszybszej propagacji) między dwoma punktami.

**W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!**

## Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur  $\Rightarrow$  "skala kosmologiczna"

**Zasada kosmologiczna:** w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy**  $\Rightarrow$  **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszone" są poszczególne obiekty.

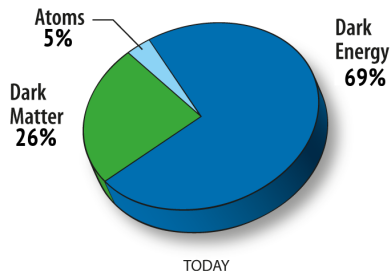
Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował z **punktowego skupiska nieskończonej energii**...

## Big Bang - Wielki Wybuch

## Model $\Lambda$ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia**... (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )



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

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



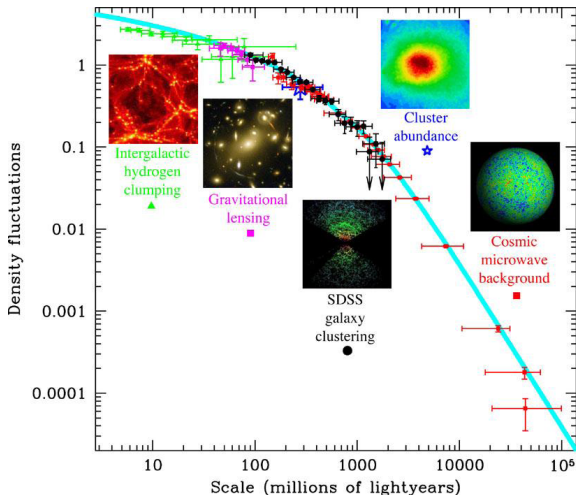
## Model $\Lambda$ CDM

Model kosmologiczny uwzględniający:

stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ ) i  
Zimną Ciemną Materię  
(Cold Dark Matter - CDM)

bardzo dobrze opisuje  
fluktuacje gęstości  
Wszechświata na różnych  
skalach odległości.

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



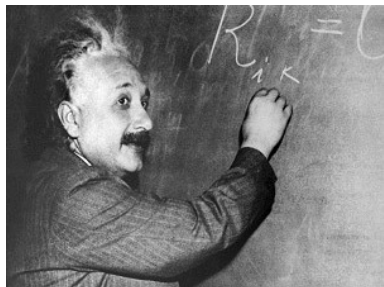
- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

Ogólna Teoria Względności, sformułowana przez Einsteina w 1916, opisuje ewolucję Wszechświata na "skalach kosmologicznych"

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

Ale co się dzieje na mniejszych skalach?

Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...



Ogólna Teoria Względności, sformułowana przez Einsteina w 1916, opisuje ewolucję Wszechświata na "skalach kosmologicznych"

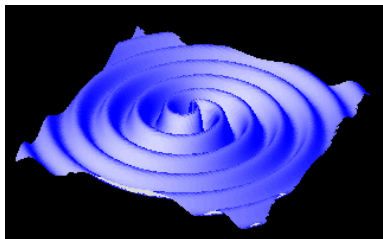
Zakładamy, że na bardzo dużych odległościach Wszechświat jest jednorodny i izotropowy.

Ale co się dzieje na mniejszych skalach?

Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...

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

Tylko fale grawitacyjne są dużo, dużo słabsze...



## Detekcja pośrednia

W 1974 Joseph Taylor i Russell Hulse odkryli pulsar PSR 1913+16.

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

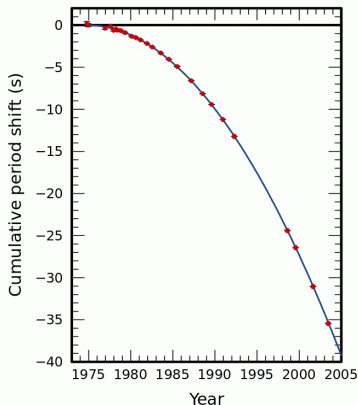
⇒ pulsar krąży dookoła innej gwiazdy w układzie podwójnym (okres 7.75 h)

Długoczasowe obserwacje pokazały, że okres obiegu się skraca

⇒ układ wiruje coraz szybciej

⇒ straty energii powodowane emisją fal grawitacyjnych

W bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami OTW ⇒ Nobel 1993





## Możliwe źródła

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

## Możliwe źródła

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

Podobnie możemy rozważać wiele różnych źródeł fal grawitacyjnych.

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

## Możliwe źródła

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

Podobnie możemy rozważać wiele różnych źródeł fal grawitacyjnych.

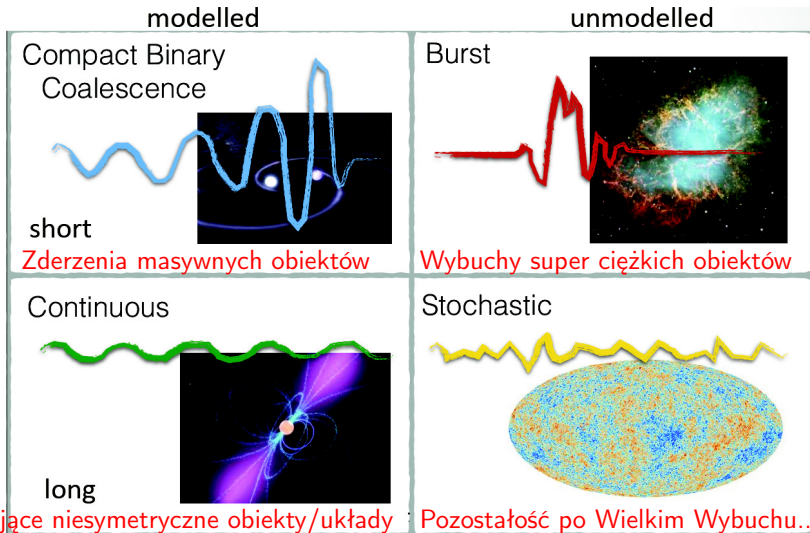
- wirujący układ podwójny dwóch masywnych obiektów
- szybko wirujący pojedynczy niesymetryczny obiekt
- zderzenie/złanie się dwóch masywnych obiektów
- (niesymetryczny) wybuch masywnego obiektu

Aby emisja fal grawitacyjnych była istotna, musimy mieć:

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



## Możliwe źródła



## Własności

Fale grawitacyjne zachowują się podobnie do fal elektromagnetycznych:

- poruszają się z tą samą prędkością (prędkość światła)
- podlegają odchyleniom na skutek zakrzywienia czasoprzestrzeni
- podlega przesunięciu ku czerwieni
- niosą energię, pęd i moment pędu (!)

Jednak fale grawitacyjne w bardzo niewielkim stopniu podlegają absorpcji w materii  $\Rightarrow$  dlatego ich wykrycie było tak trudne

**Przechodząca fala grawitacyjna nie powoduje ruchu obiektów !**

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

## Własności

Fale grawitacyjne zachowują się podobnie do fal elektromagnetycznych:

- poruszają się z tą samą prędkością (prędkość światła)
- podlegają odchyleniom na skutek zakrzywienia czasoprzestrzeni
- podlega przesunięciu ku czerwieni
- niosą energię, pęd i moment pędu (!)

Jednak fale grawitacyjne w bardzo niewielkim stopniu podlegają absorpcji w materii  $\Rightarrow$  dlatego ich wykrycie było tak trudne

**Przechodząca fala grawitacyjna nie powoduje ruchu obiektów !**

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

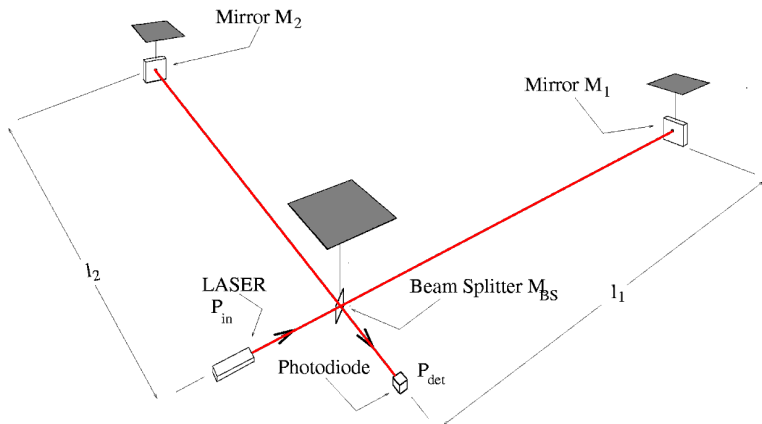
Powoduje deformację przestrzeni  $\Rightarrow$  zmianę odległości między obiektami  
 $\Rightarrow$  pomiary interferometryczne

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

## Interferometry

Idea: powtórzenie eksperymentu Michelsona-Morleya

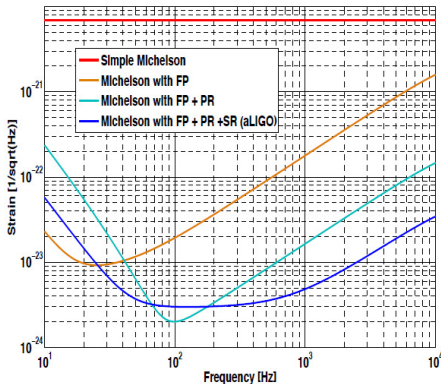
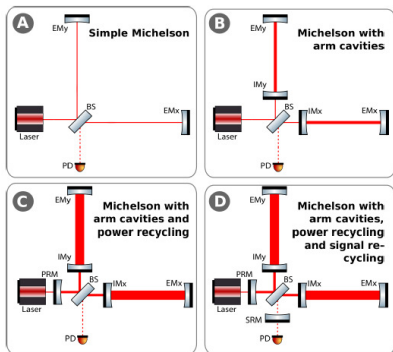
Szukamy periodycznych zmian czasu propagacji (prędkości światła)



## Interferometry

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

⇒ wnęki rezonansowe pozwalają wydłużyć drogę impulsów światła



VIRGO (Włochy) ramiona o długości 3 km



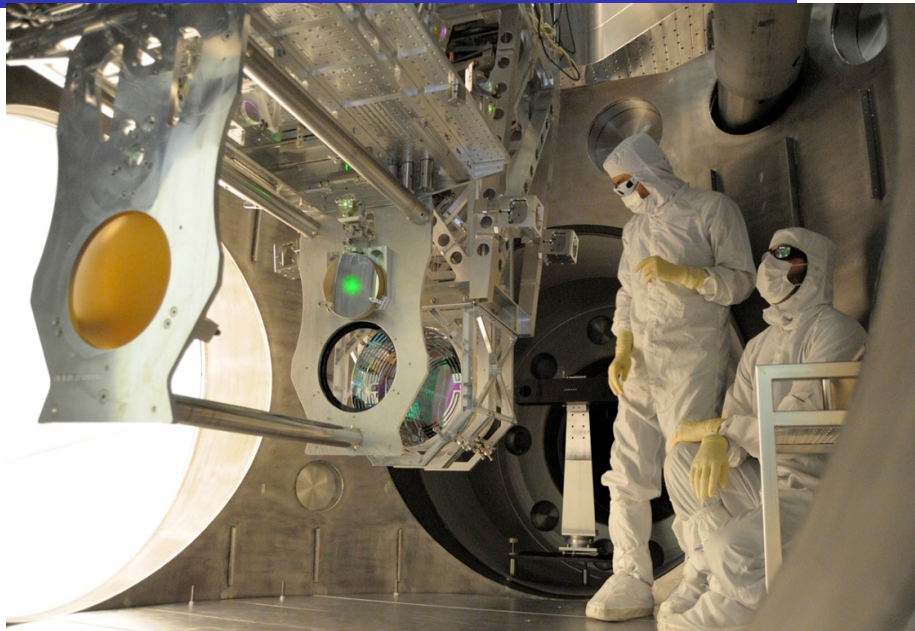
LIGO (Hanford, USA) ramiona o długości 4 km





LIGO (Livingston, USA) ramiona o długości 4 km

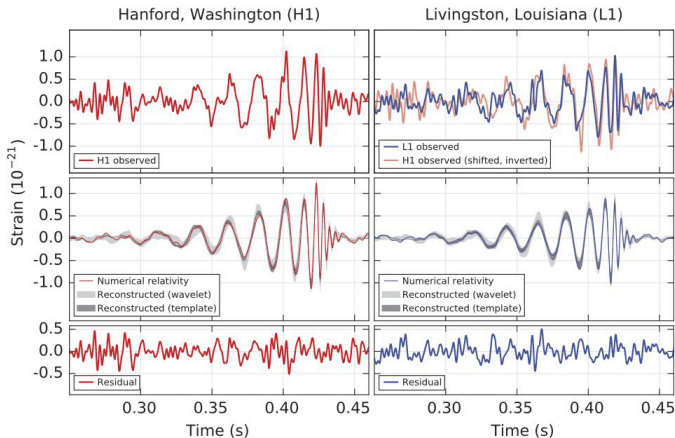




- 1 Fale grawitacyjne
- 2 Detektory fal grawitacyjnych
- 3 Odkrycie fal grawitacyjnych
- 4 GW170817

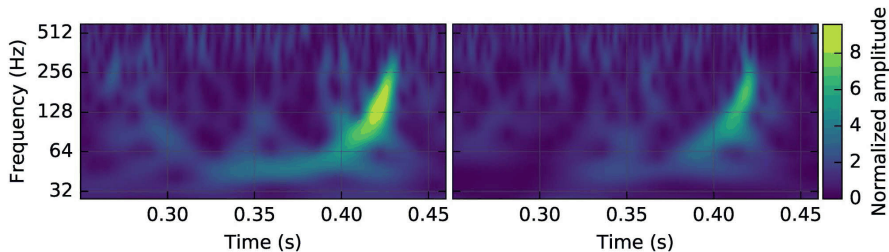
## Odkrycie

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



## Odkrycie

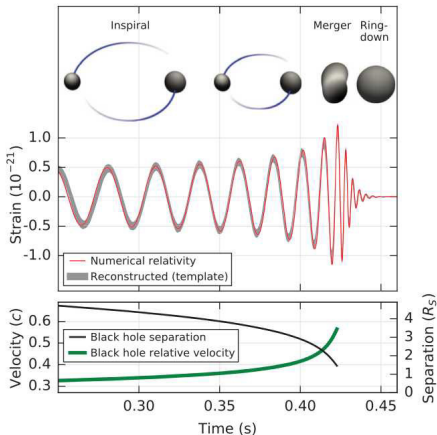
Badzo silny sygnał, wyraźnie widoczny na rozkładzie czas-częstość



Oczekiwany poziom tła dla tego natężenia sygnału:

1 przypadek na 203'000 lat !

GW150914 wygląda jak zlanie się dwóch masywnych czarnych dziur



Początkowe masy:

$$M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$$

$$M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Końcowa czarna dziura:

$$M_f = 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Odległość:

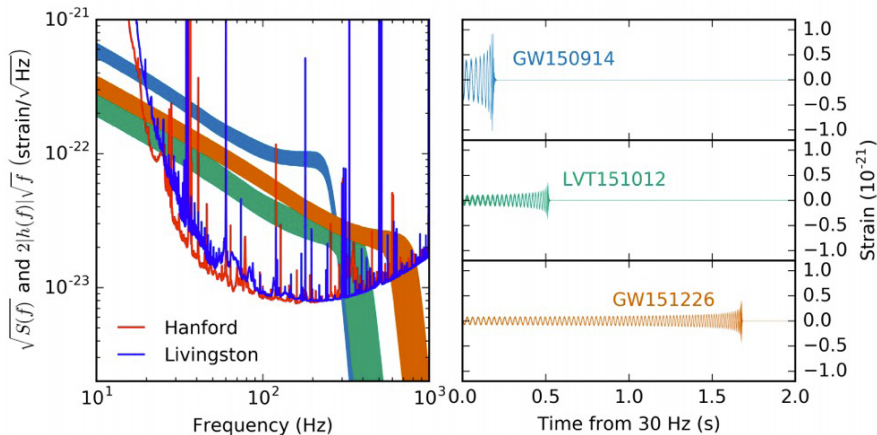
$$d = 410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

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

Dobra zgodność z OTW

## Wyniki LIGO 2015

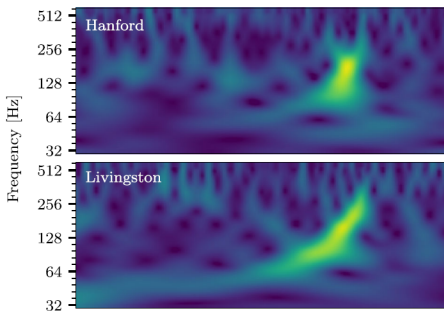
Latem 2016 przedstawiono kolejne dwa przypadki zaobserwowane przez LIGO w 2015: jeden “pewny” (GW151226) i jeden “kandydat” (LVT151012)



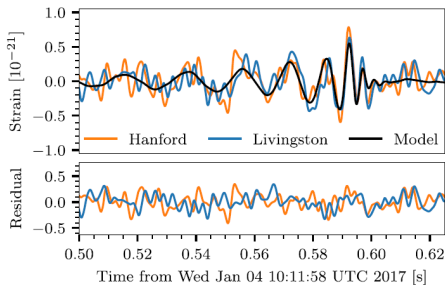
## Przypadek 2017 Zaprezentowany 1 czerwca 2017

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

### Widmo częstotliwości



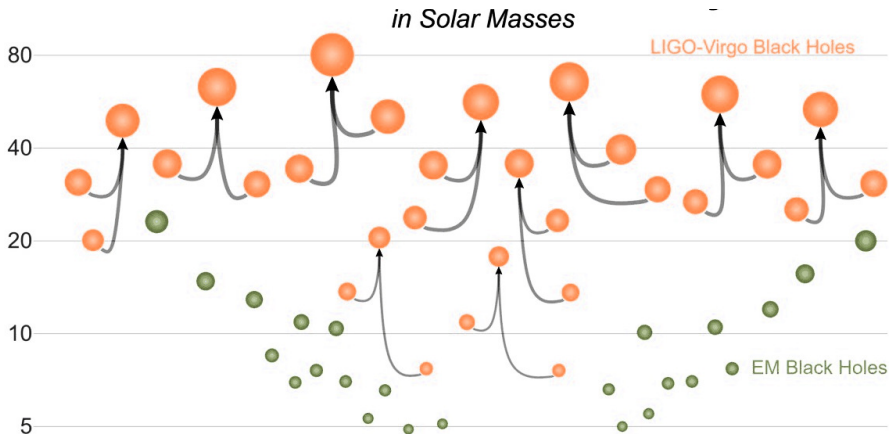
### Dopasowanie wzorca





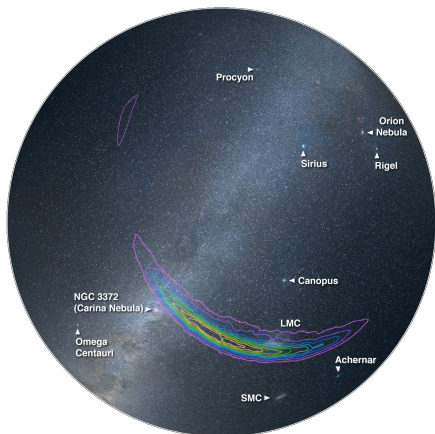
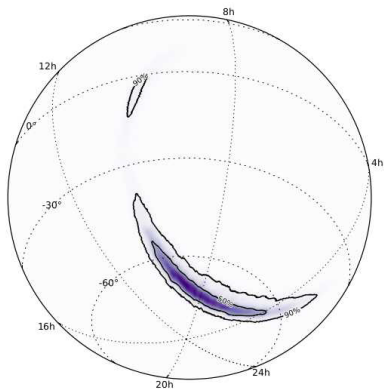
## Widmo mas czarnych dziur (2015-2017)

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



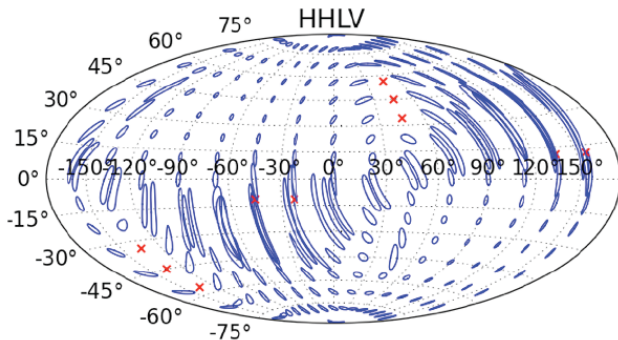
## Położenie GW150914

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



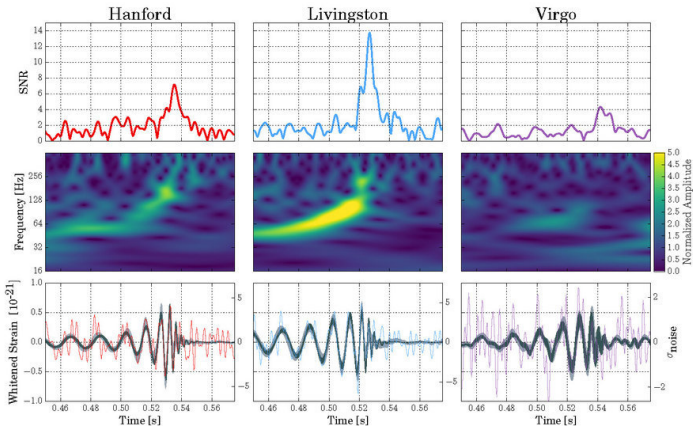
Fairhurst 2011

Red crosses denote  
regions where the  
network has blind spots

10

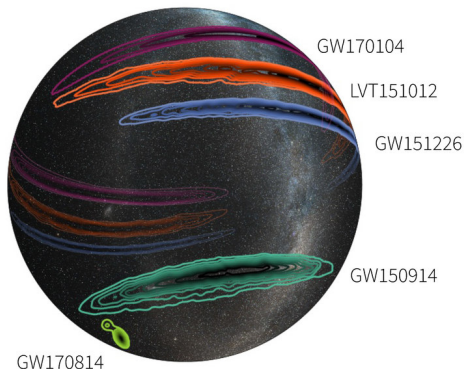
## GW170814 Potrójna detekcja

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



## GW170814 Potrójna detekcja

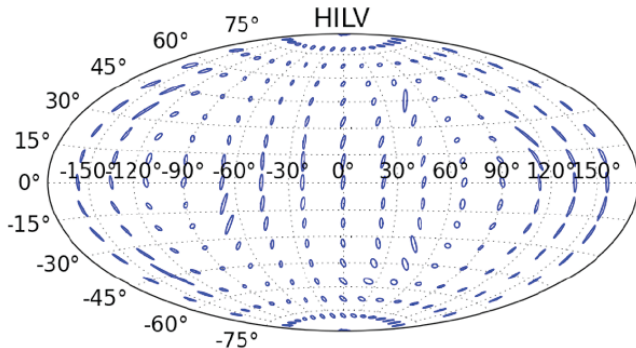
Detekcja przez trzy interferometry daje dużo dokładniejszą lokalizację!



Lokalizacja kluczowa, żeby móc poszukiwać innych sygnałów...

## Położenie źródła

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



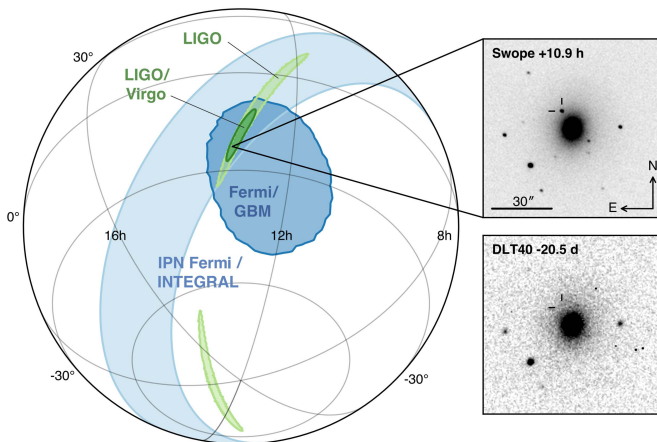
Fairhurst 2011

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

## GW170817

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

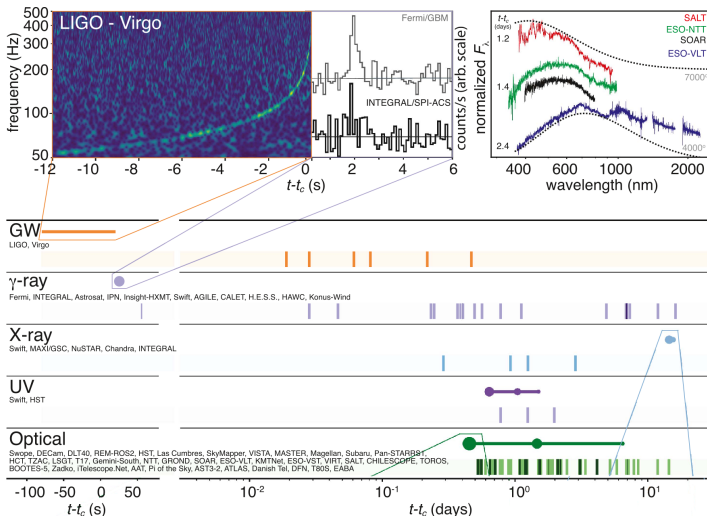
Drugi z nich był wyjątkowy! Zobaczyły go także inne eksperymenty !...





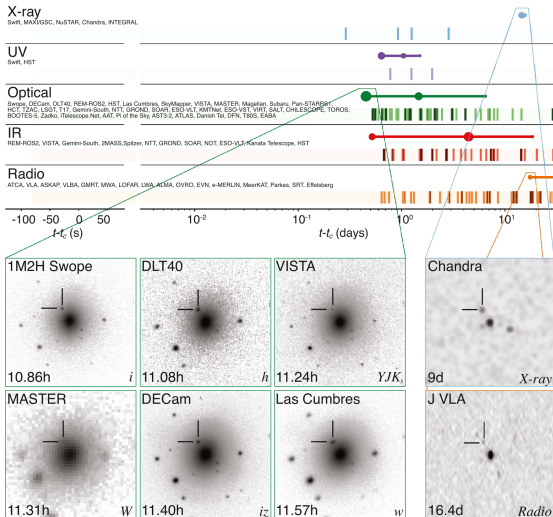
## GW170817

Jednocześnie z impulsem grawitacyjnym zaobserwowano błysk gamma...



## GW170817

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



## GW170817

Wyniki obserwacji wskazują na to, że byliśmy świadkami złania się układu **dwóch gwiazd neutronowych** o masach rzędu 1.8 i 1.1 mas Słońca.

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

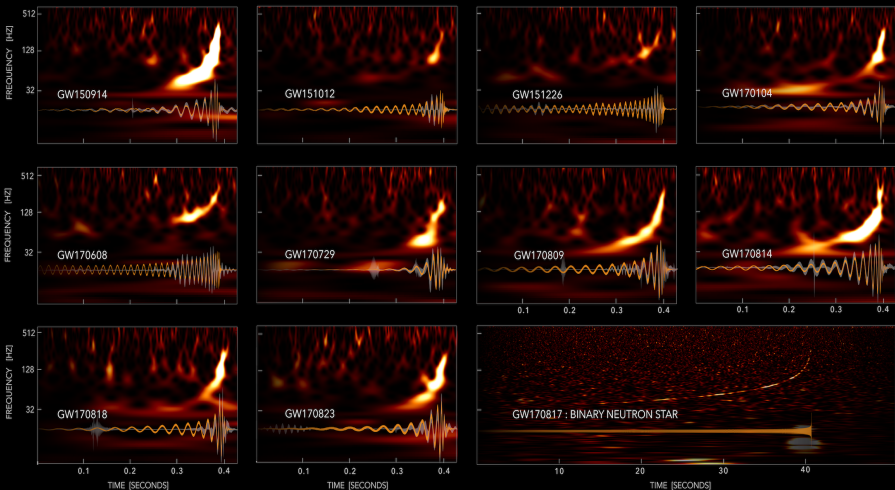
Sam wybuch trwał ok. 60 sekund, ale wyrzucone z ogromną prędkością strugi materii oddziaływały z materią międzygwiazdową jeszcze przez wiele tygodni emitując promieniowanie rentgenowskie, optyczne, radiowe...

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

**Potwierdziliśmy przewidywania Ogólnej Teorii Względności.**

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

## GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



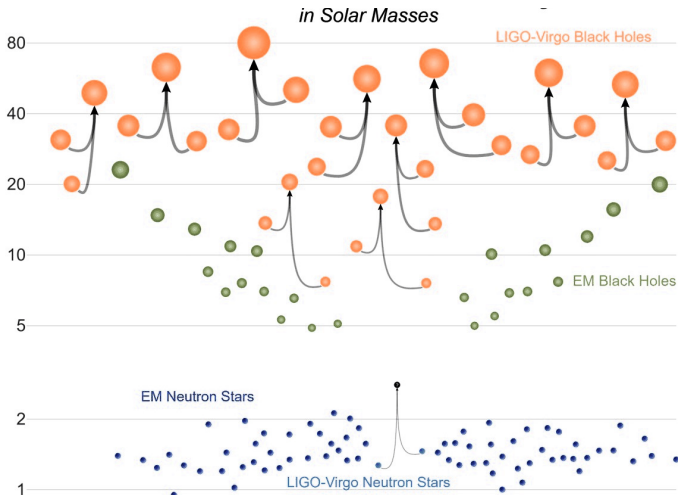
LIGO-VIRGO DATA: [HTTPS://DOI.ORG/10.7935/82H3-HH23](https://doi.org/10.7935/82h3-hh23)

■ WAVELET (UNMODELED)

■ EINSTEIN'S THEORY

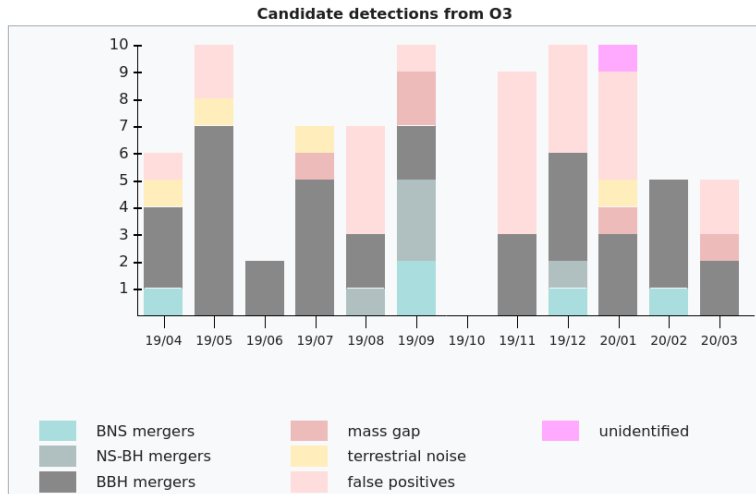
S. GHONGE, K. JANI | GEORGIA TECH

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

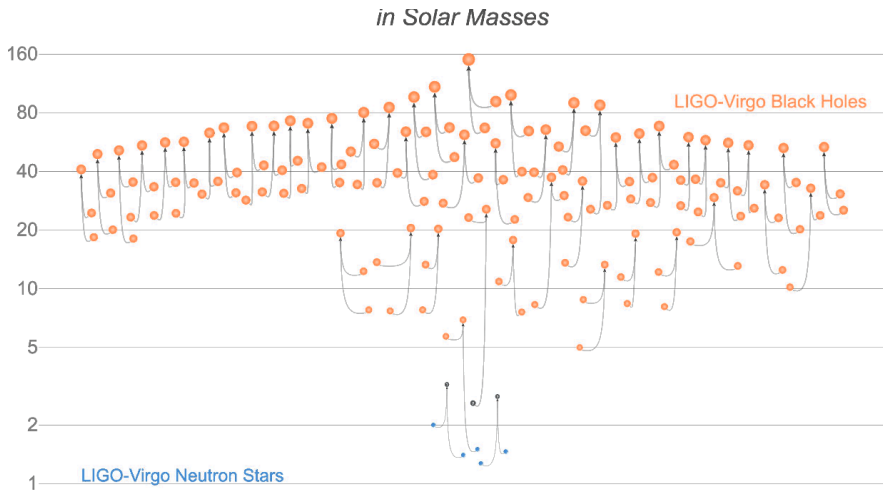


Detektory LIGO i Virgo rozpoczęły kolejny okres zbierania danych (O3) w kwietniu 2019, przerwały w marcu 2020 z powodu pandemii...

Zaobserwowano około 80 “kandydatów” różnego typu:



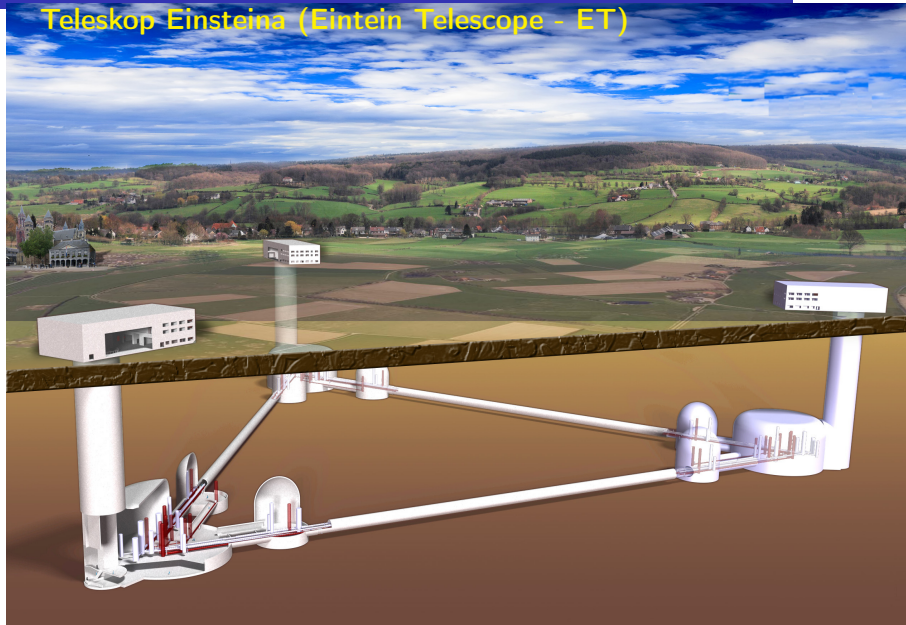
## Widmo mas czarnych dziur O1+O2+O3 (2015-2020)



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

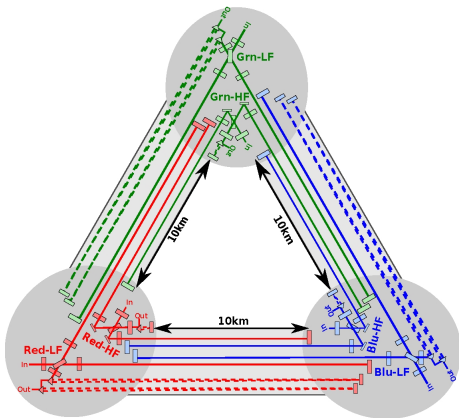
## Teleskop Einsteina (Einstein Telescope - ET)





## Teleskop Einsteina

## Eintein Telescope - ET



Ramiona o długości 10 km.

W każdej parze ramion znajdować się będą dwa interferometry:

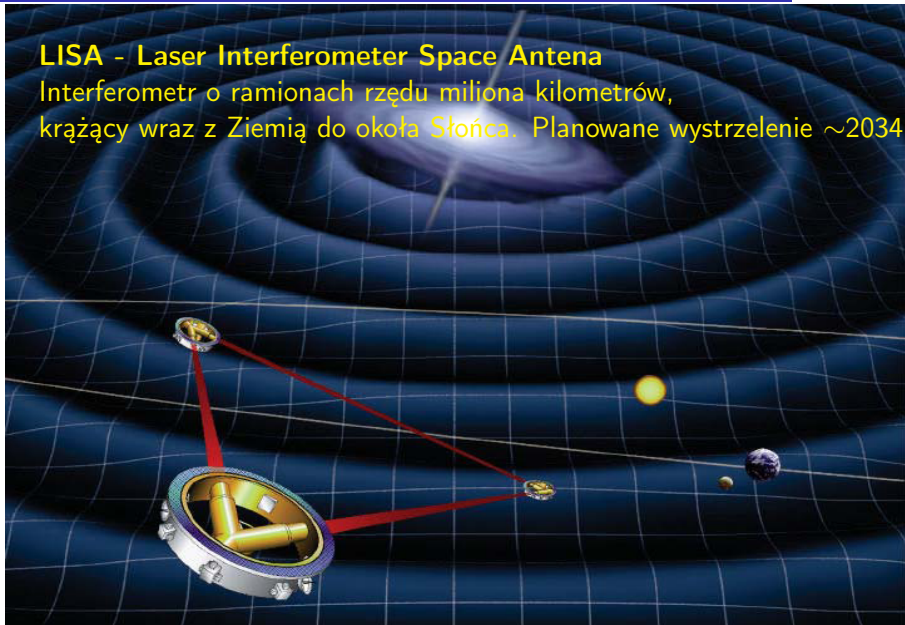
- niskiej częstotliwości - LF (zimny)
- wysokiej częstotliwości - HF (ciepły)

Łącznie 6 niezależnych interferometrów.

Decyzja o finansowaniu powinna zapadnąć wkrótce (do 2020?)

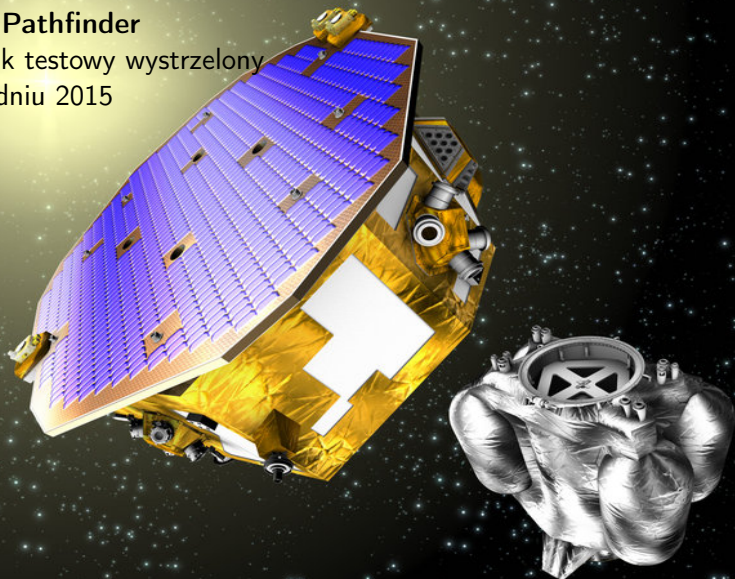
- ⇒ produkcja elementów ~ 2020
- ⇒ rozpoczęcie instalacji ~ 2025
- ⇒ zbierania danych ~ 2030

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



## LISA Pathfinder

próbnik testowy wystrzelony  
w grudniu 2015



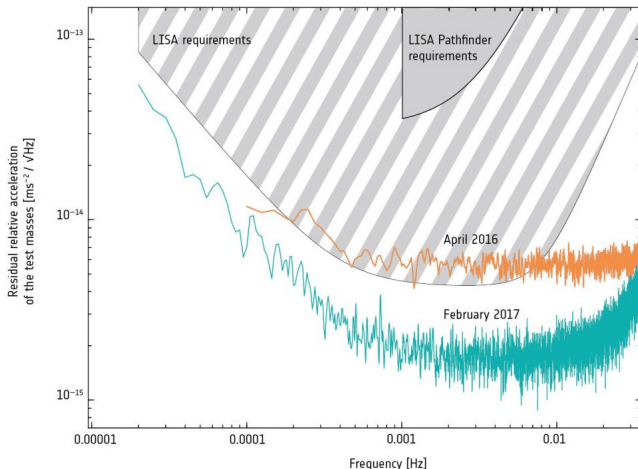
## LISA Pathfinder

próbnik testowy wystrzelony  
w grudniu 2015



Pojedynczy interferometer o długości ramion... 38 cm

## LISA Pathfinder wyniki pomiarów zakończonych w lipcu 2017



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

Detekcja fal grawitacyjnych była **przełomowym odkryciem**.

**Nagroda Nobla 2017**

W krótkim czasie **fale grawitacyjne**, w przeszłości często traktowane jako hipotetyczne i niemożliwe do zmierzenia (jak neutrino) “awansowały” do roli **ważnego narzędzia** badania otaczającego nas Wszechświata i procesów w nim zachodzących.

⇒ 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.

⇒ Nowa era w astronomii/astrofizyce...

**Jesteśmy na początku nowego etapu badań.**

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