



**Motto: „Najbardziej niezrozumiałe jest to, że wszechświat można zrozumieć”
A. Einstein**

LASEROWE **wykrywanie fal grawitacyjnych**

I. Metoda i zestaw pomiarowy

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą - WAT, Warszawa 08.05.2018

Wykrywanie fal grawitacyjnych

(Streszczenie)

Istnienie fal grawitacyjnych przewidział A. Einstein formułując OTW i opublikował przeszło 100 lat temu (1916). Pośrednio udało się potwierdzić prawdziwość tej idei, a jedno z nich zostało nawet uhonorowane w 1993 roku Nagrodą Nobla. Udokumentowanie bezpośrednie istnienia fal grawitacyjnych poprzez ich pomiar, nastąpiło w lutym 2016 [1].

Detektory fal grawitacyjnych w postaci interferometrów Michelsona rozpoczęto budować już w początkach lat siedemdziesiątych i to w wielu krajach Ameryki (USA), Europy (Niemcy, Włochy) i Azji (Japonia). Dwie najbardziej zaawansowane, oddalone od siebie o ok. 3000 km, bliźniacze konstrukcje o nazwie **LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)** powstały w St. Zjednoczonych: jedna w Stanie Washington, druga w Stanie Luizjana. To one właśnie dokonały wspomnianej wyżej pierwszej obserwacji fal grawitacyjnych pochodzących od połączenia w przestrzeni kosmicznej dwóch czarnych dziur.

Działanie układu pomiarowego jest stosunkowo proste. Typowy interferometr Michelsona, którego ramiona tworzą dwa zwierciadła przymocowane do wiszących swobodnie dwóch, mas testowych, jest wyjustowany tak, że na detektorze istnieje pole ciemne (ciemny prążek). Fala grawitacyjna w postaci zmiany stanu naprężeń w różnych punktach czasoprzestrzeni zakłóca istniejący stan równowagi, a miarą wartości zmian pola grawitacyjnego będą odchylenia mas testowych i wartość sygnału elektrycznego powstałego na detektorze interferometru. Ta prosta idea jest w przypadku wykrywania fal grawitacyjnych niezwykle trudna w realizacji. Wynika to przede wszystkim stąd, że przemieszczenie mas testowych wywołane falą grawitacyjną jest niezwykle małe, porównywalne z rozmiarem jądra atomowego. To narzuca ostre wymagania na konieczność izolowania całego układu interferometru nie tylko od zewnętrznych wpływów atmosferycznych, lecz także sejsmicznych (ruchów podłoża), oraz szumów elektroniki (termicznych i kwantowych). Dodatkową trudność stanowi fakt, że fale grawitacyjne generowane przez zjawiska zachodzące pomiędzy wielkimi masami są bardzo długie (tysiące kilometrów i więcej). Anteny odbierające te fale, które utożsamiane są z długością ramion interferometru, powinny być też odpowiednio duże. W przypadku urządzenia LIGO długości ramion wynoszą 4 km i dodatkowo są powiększane przez zwielokrotnienie przejść promieniowania w obydwu ramionach (dodatkowe rezonatory F-P). Długość ramion interferometru określa widmowy zakres częstotliwości wykrywanych fal grawitacyjnych, a tym samym gamę zjawisk w kosmosie, które mogą zostać zarejestrowane. W przypadku systemu LIGO zakres maksymalnej czułości interferometru obejmuje pasmo częstotliwości fal grawitacyjnych w granicach (10 – 1000) Hz.

Nie jest to pasmo najbardziej interesujące z punktu widzenia zdarzeń kosmicznych generujących fale grawitacyjne. Bardziej interesujący jest zakres poniżej 1 Hz. Jednak układy pomiarowe dla tego zakresu osiągają tak duże rozmiary, że mogą być zrealizowane jedynie w przestrzeni kosmicznej. Projekt taki pod nazwą **LISA (Laser Interferometer Space Antenna)** i jego odmiany istnieją. Jest nadzieja, że jeden z nich będzie w przyszłości zrealizowany.

Laser zasilający interferometr rejestrujący fale grawitacyjne ze względu na minimalizację szumu śrutowego powinien mieć możliwie wysoką moc. Laser zbudowany dla systemu LIGO jest układem niezwykle złożonym; ma moc fali ciągłej przeszło 200 W i praktycznie nieograniczoną drogę koherencji. Układ składa się z generatora sterującego (master) typu zmodernizowanego NPRO i dwóch wzmacniaczy; ostatni wzmacniacz wysokiej mocy jest regeneratywnym oscylatorem z wymuszonym sterowaniem i obejmuje 4 stopnie wzmocnienia Nd:YAG z pompą DL. Podstawowe parametry wiązki: częstotliwość i moc dostarczana do interferometru są aktywnie stabilizowane, a czystość modu podstawowego utrzymywana (filtrowana) na poziomie powyżej 99%. Jest to jeden z najbardziej wyrafinowanych systemów laserowych, jakie dotychczas zostały zbudowane. Bliższe informacje o budowie tego układu może uda mi się Państwu przedstawić w drugiej części prelekcji: „**II. Laser detektora fal grawitacyjnych LIGO**”

Wiedza o otaczającym nas wszechświecie pochodzi głównie z obserwacji docierających do nas fal elektromagnetycznych. Upraszczając możemy powiedzieć, że pozwalają nam one **wszechświat widzieć**, obserwować. Możliwość wykrywania fal grawitacyjnych otwiera nowy kanał, którym mogą docierać do nas jakościowo nowe informacje. Pozwalają one, jak twierdzi prof. K. Danzmann, **wszechświat słyszeć**. Zawdzięczamy to odkrytym 58 lat temu laserom.

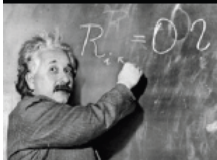
Fale grawitacyjne – czy istnieją?

Postulat A. Einsteina w Ogólnej Teorii Względności przeszło 100 lat temu (1916) [1]

GW - Fale Grawitacyjne to naprężenia (zmarszczki) czasoprzestrzeni wywołane oddziaływaniem dużych mas w kosmosie typu:

- * połączenia (kolaps) podwójnych czarnych dziur lub gwiazd neutronowych;
- ** zapadanie się czarnych dziur i gwiazd neutronowych;
- *** połączenia masywnych czarnych dziur w jądrach galaktyk itp.

Fundamental questions that gravitational-wave observations can answer



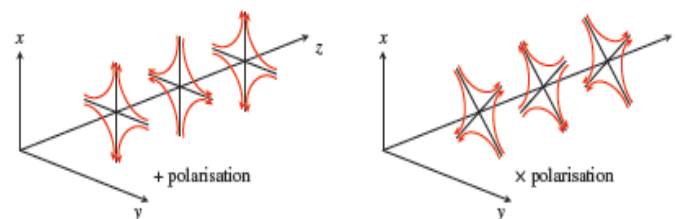
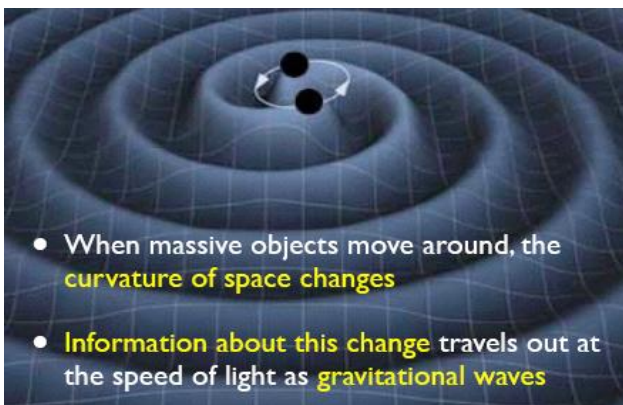
Is general relativity the correct theory of gravity?

What is the nature of one of the four fundamental forces?

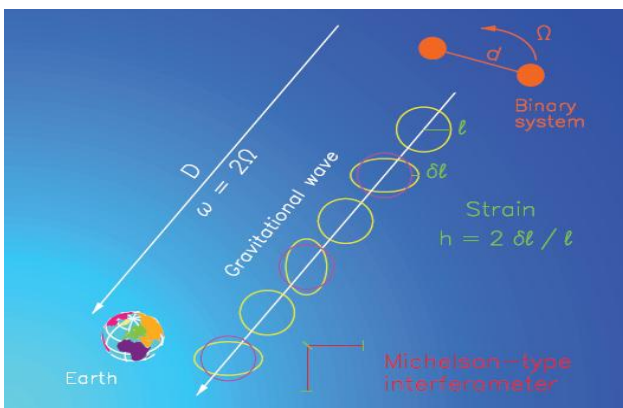
*D. Brown (Syracuse University):
„Gravitational Wave Astronomy with
Advanced LIGO and Advanced VIRGO”
(2012)*

[1] *Einstein, A. "Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation". Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin. part 1: 688–696, (1916).*

Fale grawitacyjne



$$h \approx \frac{4\pi^2 G M R^2 f_{orb}^2}{c^4 D} \quad [2] \quad \frac{\Delta L}{L} \sim h \leq 10^{-21}$$



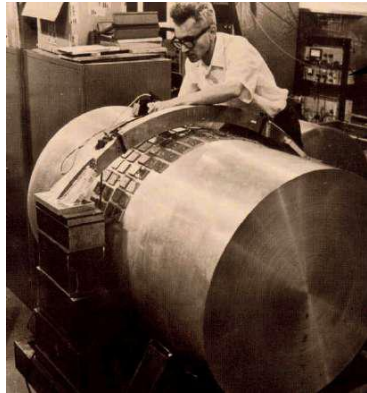
M – masa wirujących obiektów;
 $d = 2R$ – średnica zataczanego obszaru;
 $\Omega = 2\pi f_{orb}$ – częstość wirowania mas;
 D – odległość obserwatora od źródła (~ 10 Mpc).
 {1[pc] \sim 3,3[ly] \sim 3,1 \cdot 10¹⁶ [m]}

GWD - zmiany wymiarów obiektów

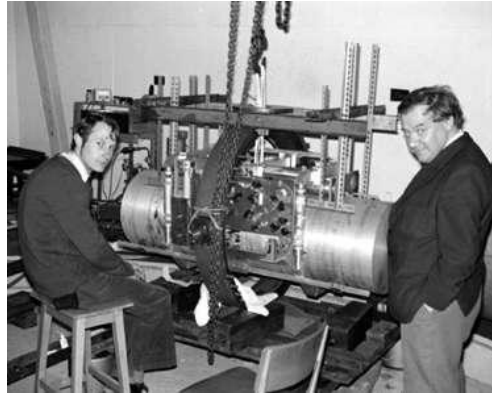
Nasze zainteresowanie zagadnieniem GWD dotyczy **wyłącznie** budowy laserowych urządzeń i możliwości ich wykorzystania.

[2] Martin Henry „Gravitational Wave Astronomy – Opening a New Window on the Universe”, Institute of Gravitational Research and Astronomy, University of Glesgow, (2013)

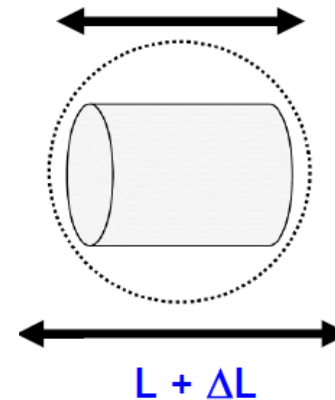
Pierwsze próby wykrycia GW – dowody istnienia



Joseph Weber -1960



Jim Hough, Ron Drever, - 1978



Pośrednie dowody istnienia GW - fal grawitacyjnych:

1. Utrata energii wirujących gwiazd neutronowych;
(1993 - Nagroda Nobla: Russell A. Hulse i Joseph H. Taylor – Princeton Univ.)
2. Zmniejszanie się emisji promieni X dwóch wirujących białych karłów;
(1999 - wykryte przez satelitę ROSAT).

Przełom w możliwości wykrywania GW

1960 – opracowanie pierwszego generatora fal optycznych – **LASERA** [3,4]
(Realizacja w zakresie optycznym idei A. Einsteina z 1917 r.)



T. Maiman (1927 – 2007)

Szybki rozwój dziedziny: **Wiek XXI – wiek fotoniki**

Technika szczególnie przydatna w metrologii –
możliwość pomiarów nanometrowych przemieszczeń
metodami interferometrycznymi. **Lasery powinny**
sprostać wymaganiom możliwości wykrycia GW

Zastosowania o znaczeniu cywilizacyjnym:

1. Wzorzec czasu – 10^{-18} ; zmiana definicji sekundy;
2. Metrologia laserowa w przestrzeni kosmicznej;
3. **Możliwość detekcji fal grawitacyjnych (GWD)**

[3] Th. Maiman „Stimulated Optical Radiation in Ruby” *Nature*, **187**, 4736, pp. 493 – 494 (1960)

[4] A. Einstein „ Zur Quantentheorie der Strahlung” *Physikalische Zeitschrift* **18**, pp121-128, (1917)

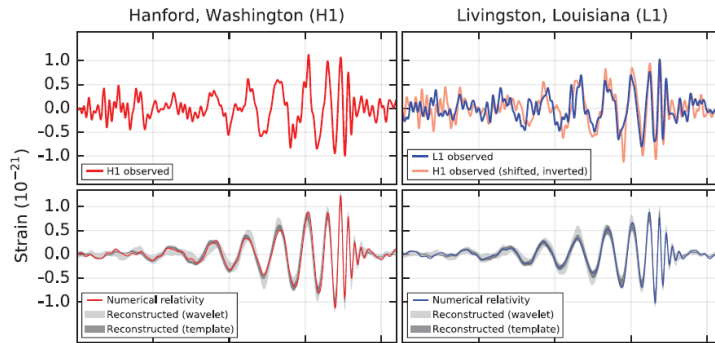
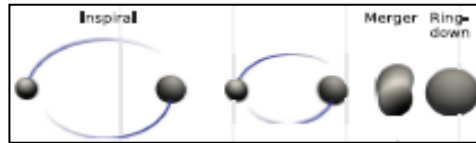
Rewelacyjna informacja - styczeń 2016!

Obserwatorium **LIGO** wykrywa GWD (**L**aser **I**nterferometer **G**ravitational **W**ave **O**bservatory)

Czas budowy **43 lata**: 1972 → 1996 → 2015

2016 – pierwsza obserwacja GW [5]

Dwie identyczne instalacje



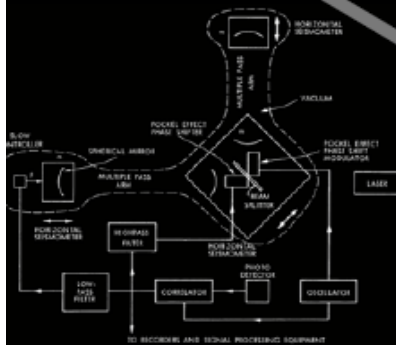
Artykuł B. Abbot'a zawiera 4 str. współautorów i wymienia kilkadziesiąt instytucji współpracujących; z Polski wymieniono 5: Obs. Astr. UW; Inst. Astr. UZG; UB; NCBJ – Świerk; CAMK – PAN (Warszawa)

[5] B. P. Abbott et al. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Phis. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016)

Historia budowy Initial LIGO - iLIGO

Decades of work in gravitational-wave detector science is about to pay off

1972



Weiss' design for a **first-generation** gravitational-wave interferometer:
LIGO



Construction of LIGO facilities

1994

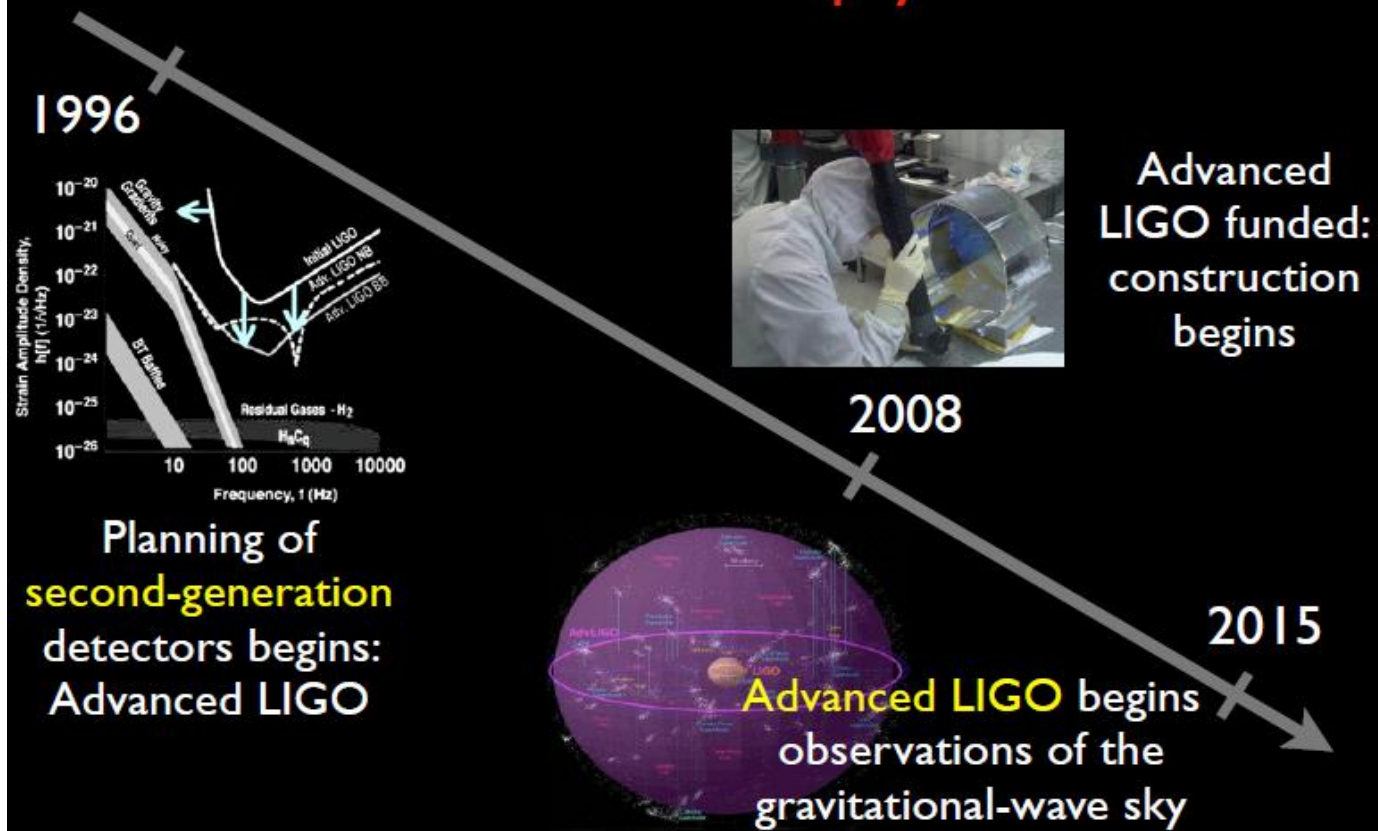


2005

Initial LIGO reaches design sensitivity

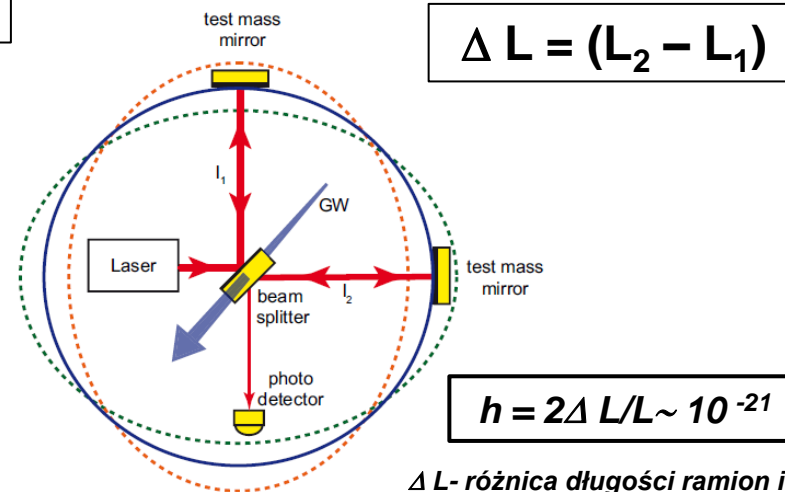
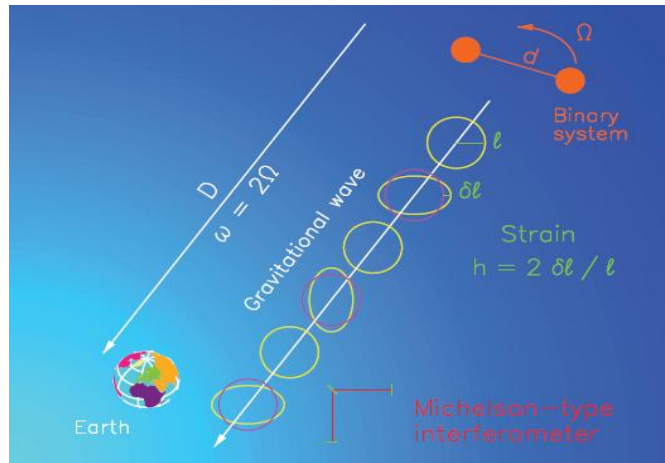
Historia budowy Advanced LIGO - aLIGO

Advanced LIGO will detect gravitational waves from astrophysical sources



Zasada detekcji GWD interferometrem Michelsona [6]

GWD – Gravitational Wave Detector



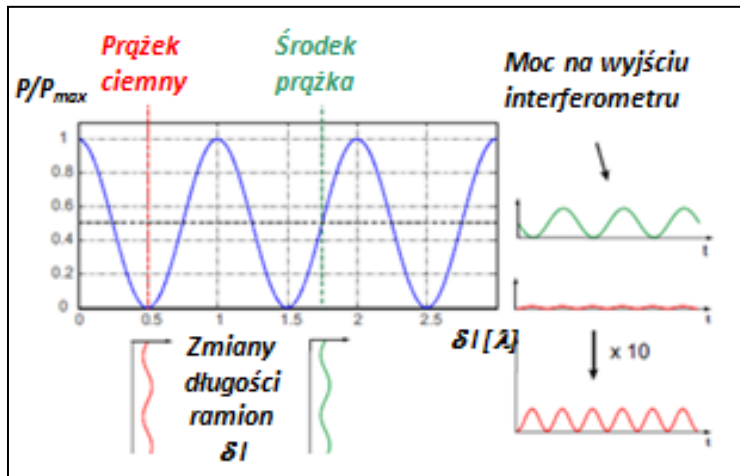
ΔL - różnica długości ramion interfer.
 L - długość ramienia interferometru

Naprężenia czasoprzestrzeni wywoływane falami grawitacyjnymi powodują zmianę długości ramion interferometru.

Sygnal z detektora wykrywa różnicę dróg tzn. wykrywa fale grawitacyjne.

[6] Benno Willke „Stabilized laser for advanced gravitational wave detectors” Laser & Photon. Rev., 1-15 (2010)

Zasada pomiaru różnicy długości ramion – wykrywania fal grawitacyjnych



Mimo, że sygnał obrazujący zmiany długości ramion interferometru są maksymalne dla środka prążka (kol. zielony), wykrywanie fal grawitacyjnych we wszystkich **GWDs** odbywa się przy prążku ciemnym (czerwony).

1. metody zerowe są czulsze;
2. mniejszy wpływ zakłóceń.

Ta prosta zasada napotyka duże trudności realizacyjne: **Dlaczego (?)**

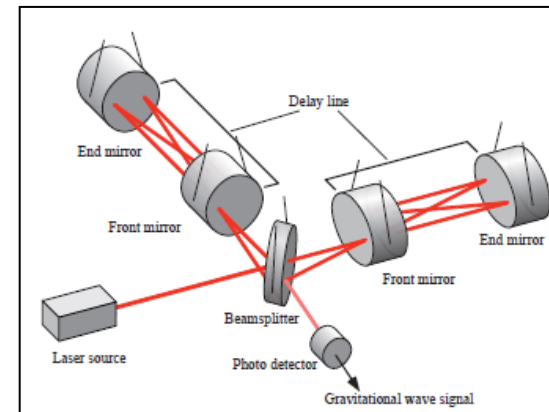
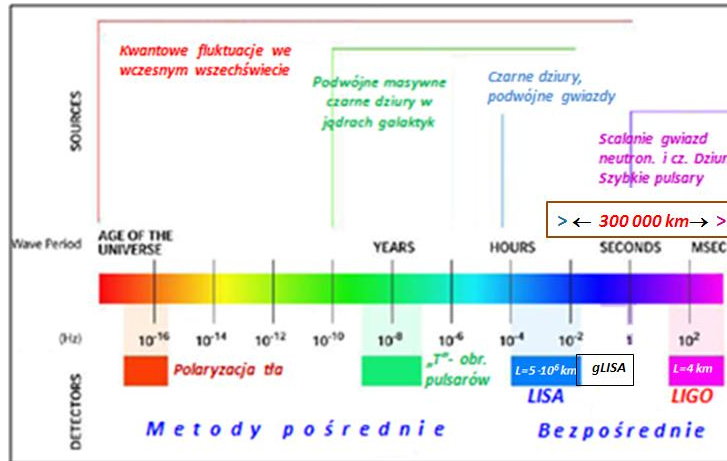
1. **Różnica dróg jest bardzo mała (mniejsza od średnicy jądra atomowego),**
2. **W warunkach ziemskich istnieją wpływy silnie zakłócające pomiar.**

Wykrywanie „GW” wymaga budowy bardzo wyrafinowanego układu laserowego.

Zwróćmy uwagę na szereg problemów jakie należy pokonać !!!

1. Antena

Ramiona interferometru Michelsona traktowane są jako anteny odbiorcze GW [7]



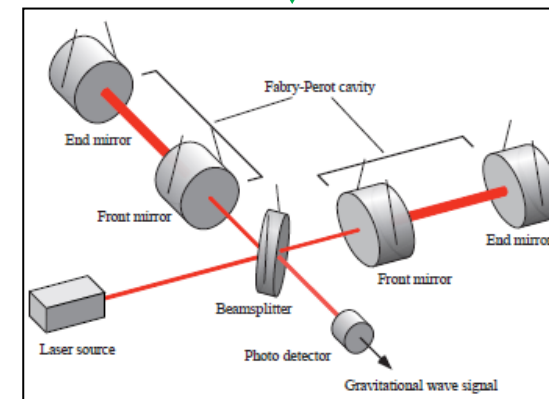
Dla $F_g = 1 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = c/f = 300\,000 \text{ km}$

$$L_{opt} \approx \frac{\pi c}{2\omega_G} = \frac{\lambda_g}{4}$$

LIGO – zakres akustyczny:
(10 ÷ 10 000) Hz
dla $F_g = 1 \text{ kHz} \lambda_g = 300 \text{ km}$

$L_{opt} \sim 75 \text{ km}$ (praktycznie niewykonalne)

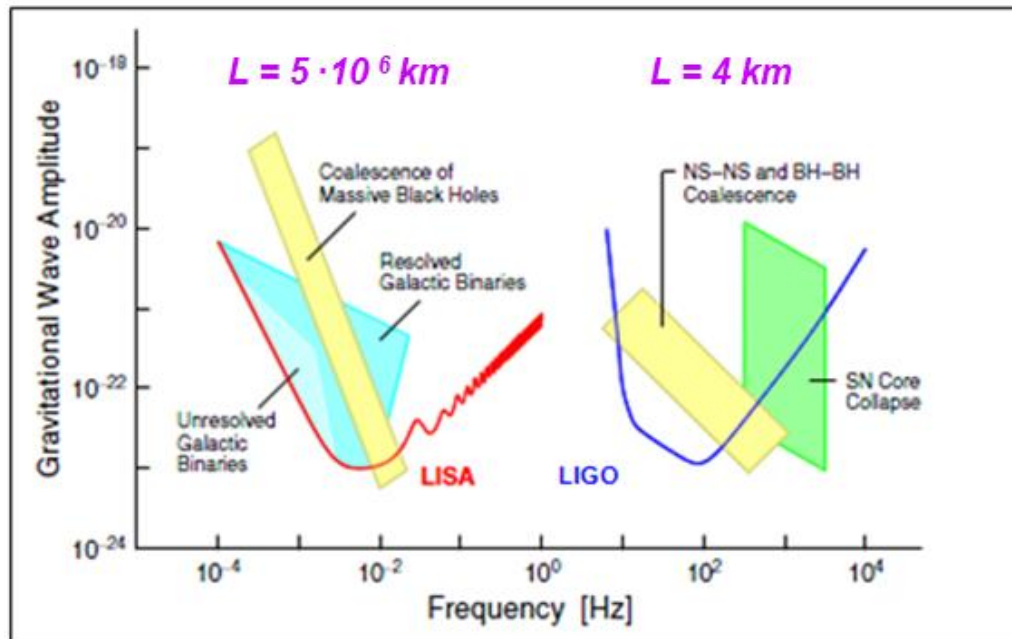
LIGO: $L = 4 \text{ km}$



[7] Masaki Ando „Power recycling for an interferometric gravitational wave detector” Disertational Thesis, Dep. of Phisics, Faculty of Science, University of Tokyo (1998).

2. Pasmo detekcji

Długość „anteny” - pasmo czułości GWD [8]



LISA -
Laser
Interferometer
Space
Antenna

Pożądana czułości aparatury:

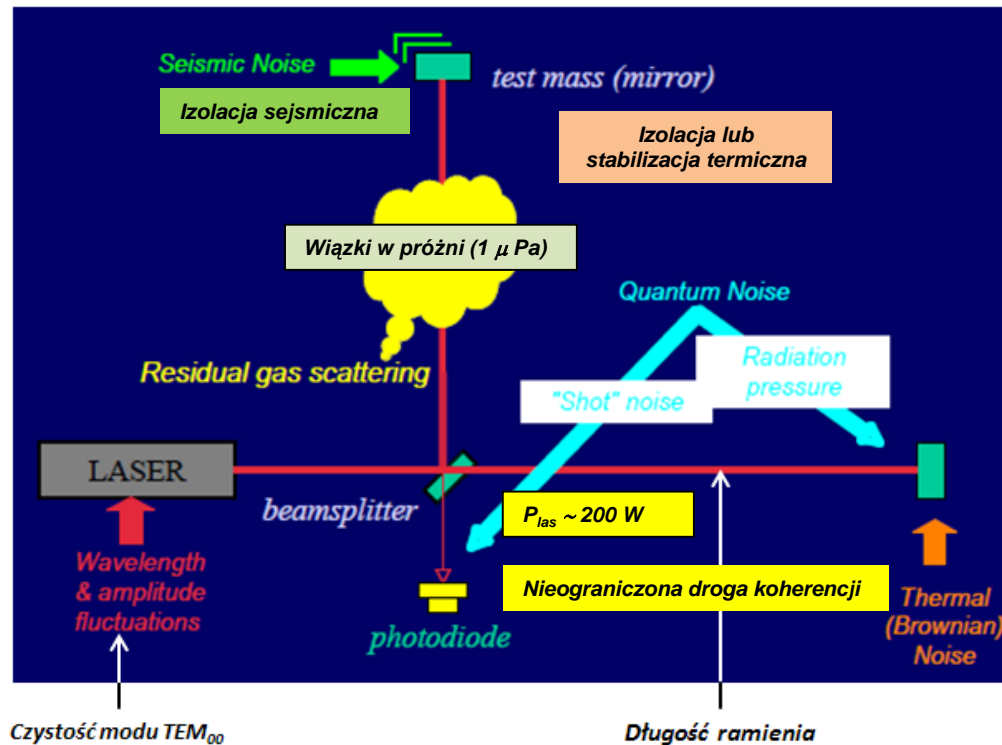
$$h = 2\Delta L/L \sim 10^{-23}$$

Konieczność: *eliminacji wpływów zewnętrznych, zakłóceń i szumów, stabilizacja wszystkich parametrów wiązki laserowej*

[8] K. Danzmann, A. Rudiger „LISA technology – concept, status, prospects” IOP Publishing Class. Quantum Grav. 20, (2003), S1 – S9.

3. Zakłócenia i szумы

Uwzględniane wpływy, zakłócenia i szумы [9]



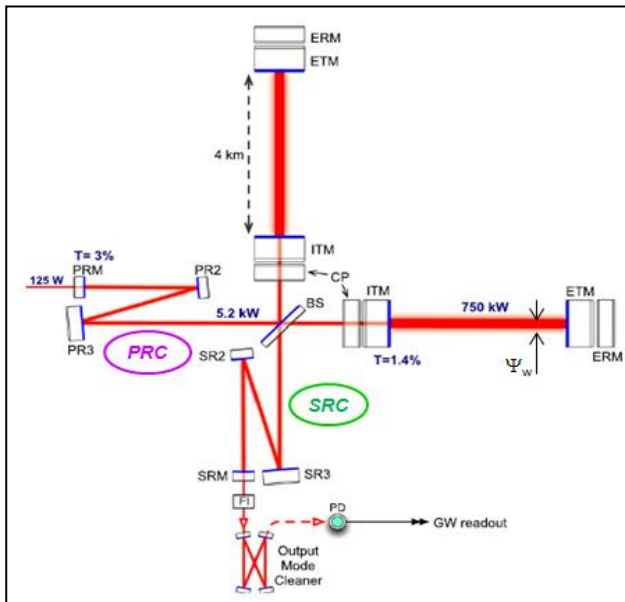
Od budowy LASERA zależą: droga koherencji, szумы kwantowe, stabilność mocy i częstotliwości oraz czystość przestrzenna modu TEM₀₀ (rozkład Gaussa)

[9] Stefan Ballmer „Advanced LIGO, Advanced VIRGO and KAGRA: Precision Measurement for Astronomy” LVC Miami (Dec.18, 2012)

4. Moc i średnica wiązki

Schemat optyczny interferometru [10]

W pasmie LIGO – istotny „szum śrutowy”: wymaga dużej mocy sygnału



Moce krążące we wnękach F-P:

$$T_{ITMs} = 1,4 \% ; T_{ETMs} \cong 0$$

- efektywna liczba przejść,
moc fali stojącej we wnęcie

- * krążąca moc we wnękach ramion ~ 750 kW;
- * krążąca moc we wnęcie PRC $\sim 5,2$ kW;
- * moc padająca na $PR_1 \sim (120 \div 165)$ W;

PRC – **P**ower **R**ecykling **C**avity

SRC – **S**ignal **R**ecykling **C**avity

$$\Psi_w = 60 \text{ mm}$$

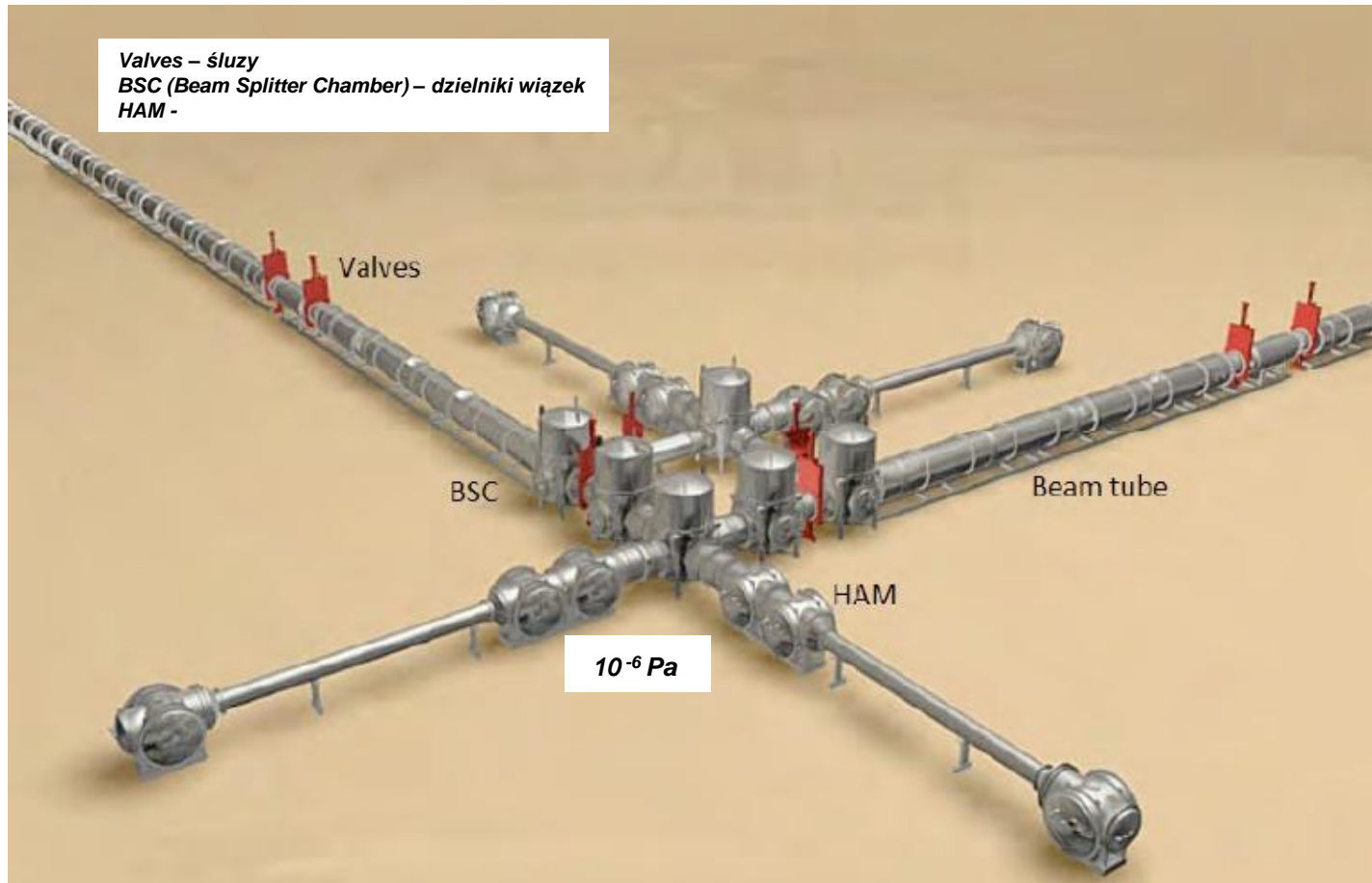
Redukcja szumów elasto-termicznych ruchów
Browna w powłokach zwierciadeł ITMs i ETMs.

LASER: $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, $P_{las} \sim 200$ W; **jednoczęstotliwościowy**,
(bardzo duże wymagania)

[10] Muzamil A. Arain, Guido Mueller „Design of the Advanced LIGO recycling cavities” OPTICS EXPRESS 16, No. 14, (2008)

5. Tory wiązek

Próżniowe tory wiązek interferometru GWD - eLIGO

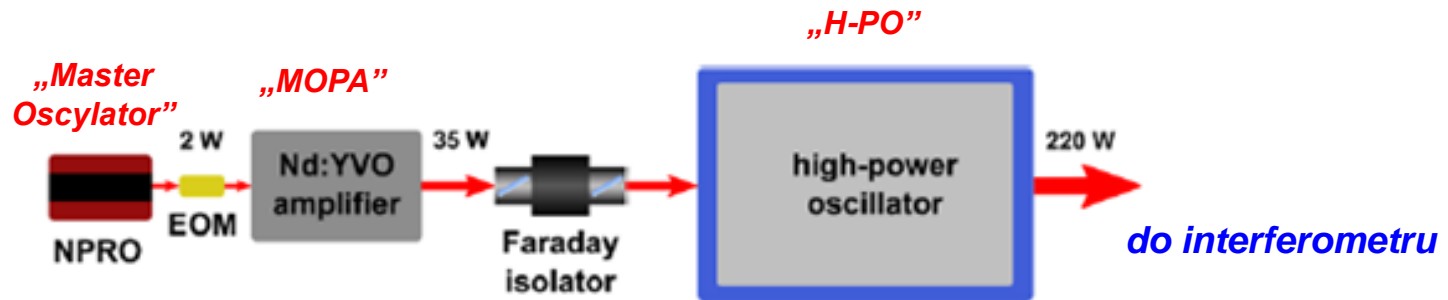


Stalowa rura, którą prowadzone są wiązki
– ciasno, ale bez przesady



6. Realizacja systemu laserowego

Uproszczony schemat blokowy systemu laserowego GWD „LIGO” [11]



„MO” - NPRO – Non Planar Ring Oscillator [12] – jednoczęstotliwościowy laser Nd:YAG (DPSSL) o dużej stabilności; (produkowany seryjnie).

„MOPA” - wzmacniacz średniej mocy: 4 stopnie Nd:YVO₄ z pompą DL.

„H-PO” - regeneratywny wzmacniacz (oscylator) dużej mocy z wymuszonym sterowaniem (injection locking): 4 stopnie Nd:YAG z pompą DL.

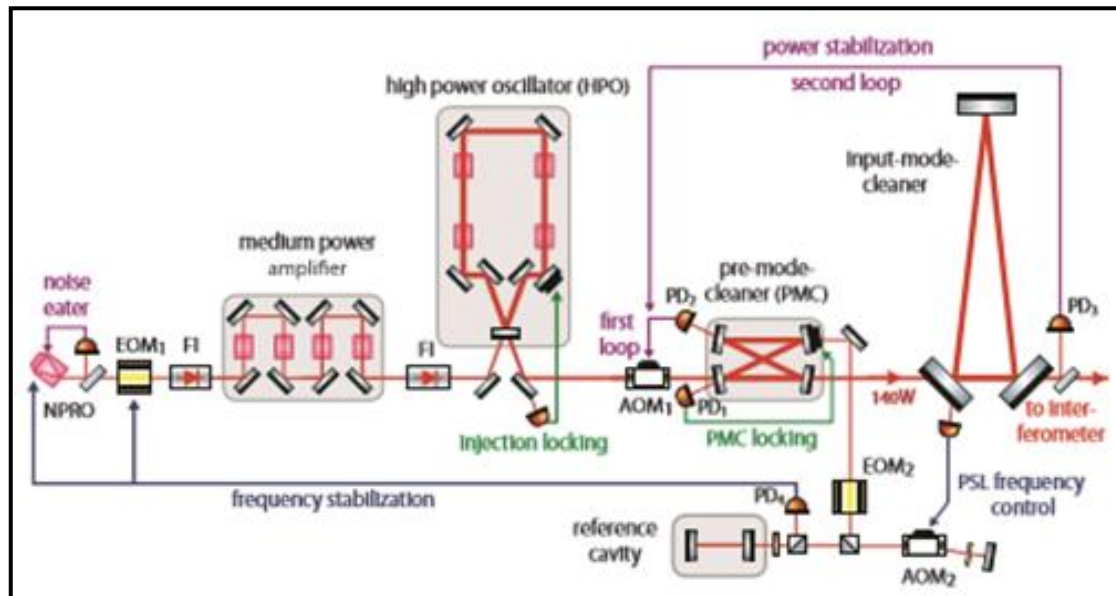
[11] L. Winkelmann et al. „Injection-lacked single-frequency laser with an output power of 220 W” Appl. Phys. B, 102, 529-538, (2011)

[12] T. J. Kane, R. L. Byer „Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser”, Optics Letters, 10, 2 (1985)

6. Czynna stabilizacja parametrów lasera

Uproszczony schemat optyczny lasera GWD LIGO [13]

Jeden z najbardziej wyrafinowanych spośród zbudowanych dotychczas układów laserowych



- Pętla kontroli i stabilizacji częstotliwości promieniowania układu laserowego
- Pętla eliminacji szumów i stabilizacji mocy wiązki lasera
- Pętla synchronizacji (injection locking)
- Filtracja modu podstawowego – TEM₀₀ (MC – Mode Cleaner)

[13] P. Kwee et al. „Stabilized high-power laser system for the gravitational wave detector advanced LIGO” OPTICS EXPRESS 20, No. 10, (2012)

7. „Dlaczego”?

Globalna sieć GWDs [14]



Czy dostatecznym powodem jest sprawdzenie słuszności OTW A. Einsteina?

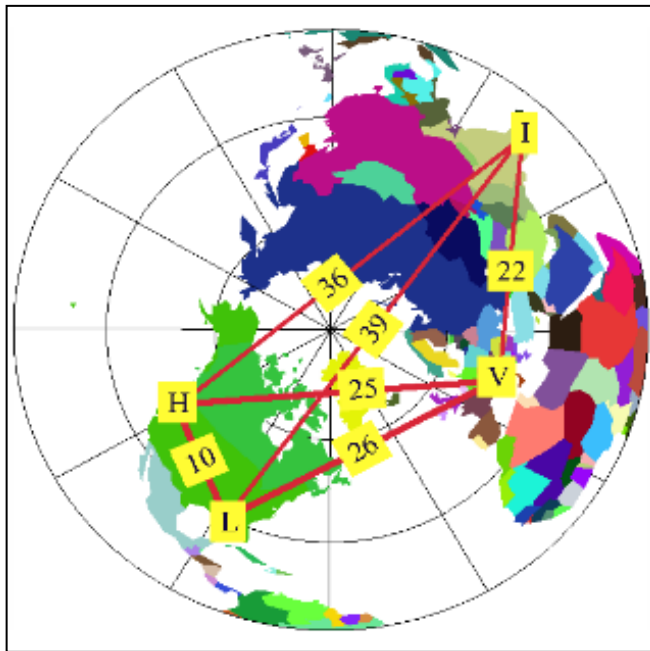
W budowie: LISA (kosmos- $5 \cdot 10^6$ km) KAGRA (Japonia – 3 km), LIGO – INDIA (Indie – 4 km).

[14] Krystyna Wosińska „Ewolucja wszechświata : czarne dziury i fale grawitacyjne” Wykład 13, WF PW

8. Sieć pomiarowa

Sieć pomiarowa LIGO – Virgo

Do sieci wejdą cztery GWDs: LIGO Luisiana, LIGO Washington, LIGO India, i VIRGO



Liczby w kwadratach pomiędzy stacjami
≡ czasowi przelotu fali grawitacyjnej w [ms]

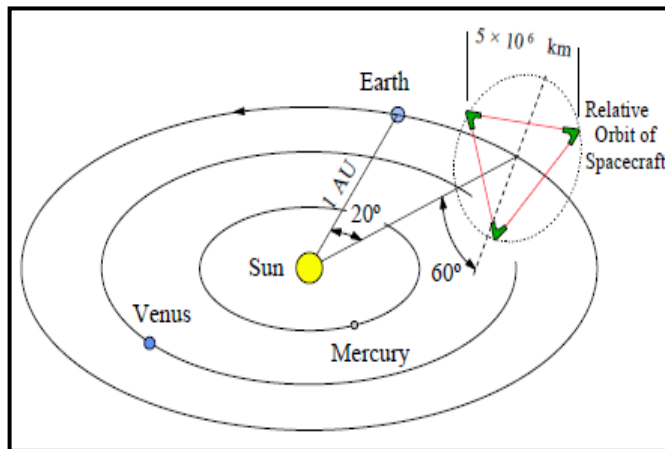
Znajomość czasów opóźnień odbieranych sygnałów w poszczególnych stacjach umożliwi wyznaczenie kierunku propagacji fal grawitacyjnych. (Możliwe po zbudowaniu LIGO India ok. 2020 r.)

9. Projekty w kosmosie!

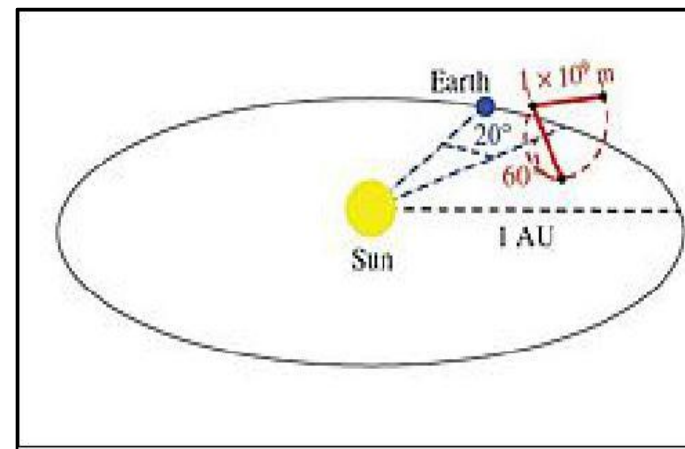
Projekt **LISA** (**L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna) [16]

Czy i kiedy wokół naszej planety będą krążyć systemy laserowe wykrywające fale grawitacyjne w pasmie ($10^{-2} \div 10^{-4}$) Hz. [Zgodnie z założeniami początek prac 2016 \(?\)](#)

LISA



eLISA

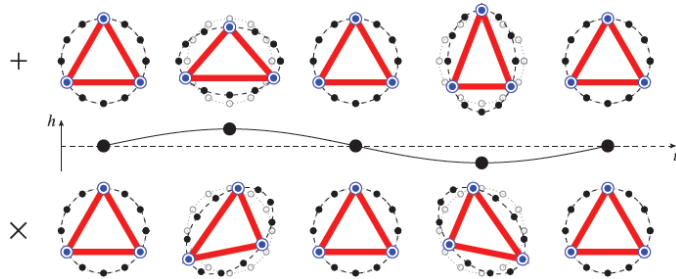


(Określenie kierunku rozchodzenia się fal)

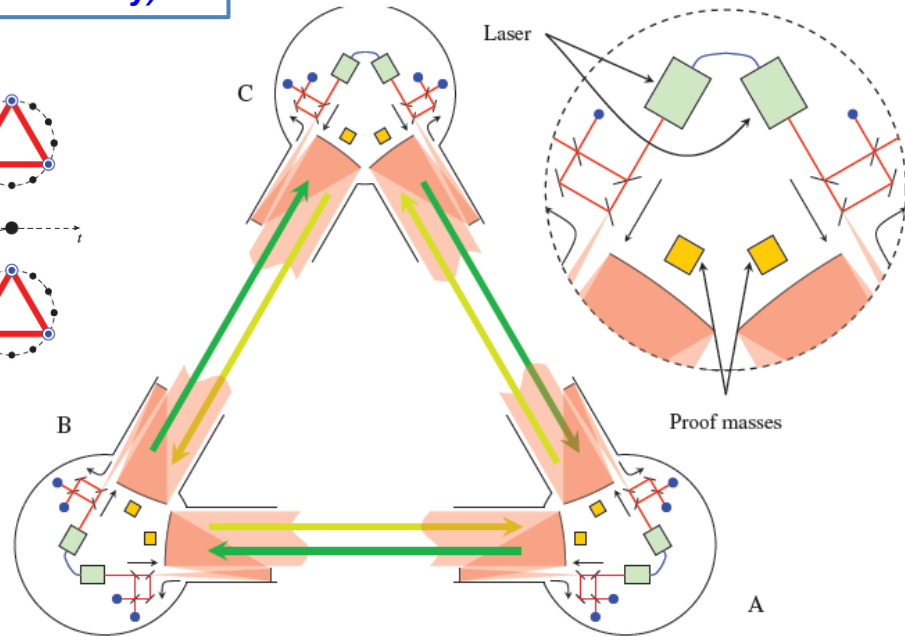
[16] „LISA Unveiling a hidden Universe”, Assessment Study Report, European Space Agency, February 2011.

Idea wykrywania fal grawitacyjnych GWD „LISA”

Wpływ fal grawitacyjnych na położenie mas testowych w satelitach (trójkąt równoboczny).



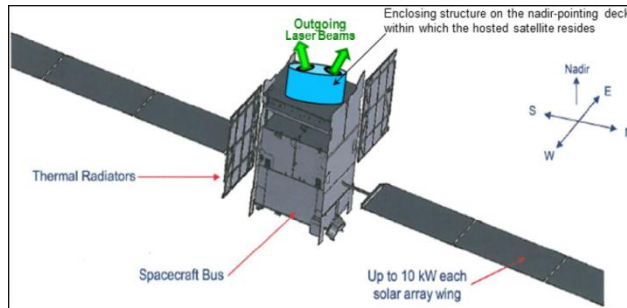
Różnica dróg h jest wynikiem pomiaru długości ramion trójkąta



A, B, C – satelity umieszczone w odległości od siebie $5 \cdot 10^6$ km.

Zarys programu GWD „gLISA”

Program GWD „LISA” jest bardzo ambitny i skomplikowany ale niezwykle kosztowny. To powód propozycji znacznie tańszego programu budowy GWD „gLISA” opartego na wykorzystaniu do tego celu trzech satelitów geostacjonarnych [17].



Geostacjonarne satelity jest dodatkowo wyposażone w nadawczo - odbiorcze układy laserowe do heterodynowego pomiaru zmian odległości pomiędzy nimi.

Odległość pomiędzy satelitami geostacjonarnymi tworzącymi trójkąt równoboczny wynosi **73 000 km**, a pasmo maksymalnej czułości wynosi $(3 \times 10^{-2} \div 1)$ Hz i prawie styka się z pasmem z GWD budowanych na ziemi $(10 \div 10^4)$ Hz.

Oszczędności budowy takiego systemu wynikają głównie z wieloletniego wykorzystania satelitów geostacjonarnych do celów telekomunikacyjnych.

[17] M. Tinto, D. DeBra, S. Buchman, S. Tilley: „gLISA geosynchronous laser interferometry space antenna concepts with off-the-self satelites” Review of Scientific Instruments 86, 014501 (2015)

Misja LPF (LISA Pathfinder) [18] Badania ostatnich dwóch lat (2016 – 2017)

LISA – odłożony w czasie (rezygnacja NASA: brak środków) [2028-2034]

2016 - 2017 - Misja LPF (LISA Pathfinder – Misja Pionierska) głównie ESA
z udziałem aparatury NASA.

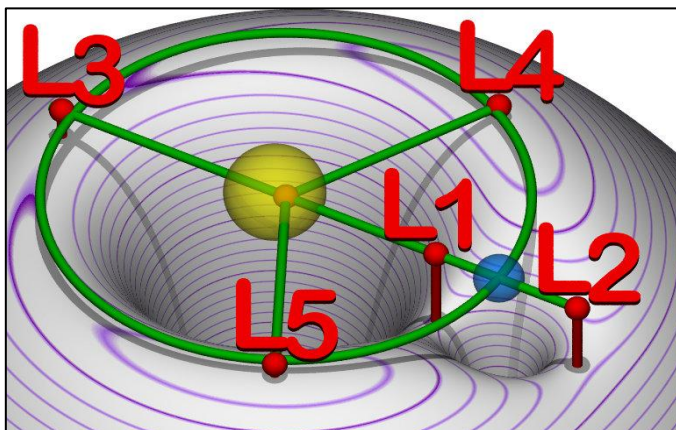
Cel: Sprawdzenie kluczowych technologii niezbędnych do precyzyjnego pomiaru odległości pomiędzy satelitami jak w projekcie LISA i eLISA

Początek Misji – 03.12.2015; Zakończenie misji – 18.07.2017
Rakieta nośna: Vega VV06; Start Spatial Centre KOUROU (Gujana Fr.)
Miejsce Misji: Orbita Lissajous wokół p. L_1 na linii łączącej Ziemię i Słońce
(w odległości 1,5 mln. km od Ziemi)

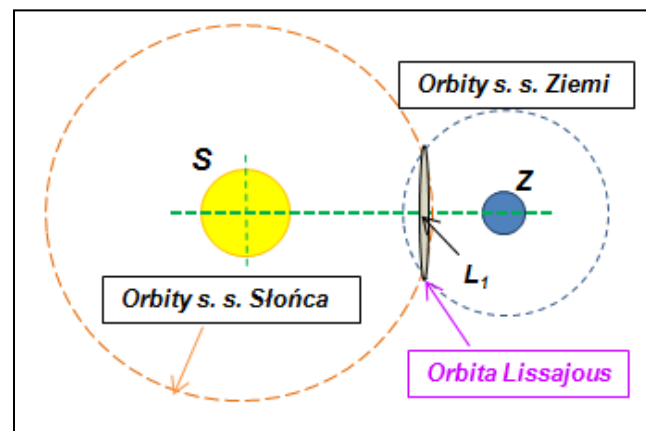
[18] „LPF (LISA Pathfinder) Mission” , <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/lisa-pathfinder>

Punkty Lagrange'a i Orbita Lissajous

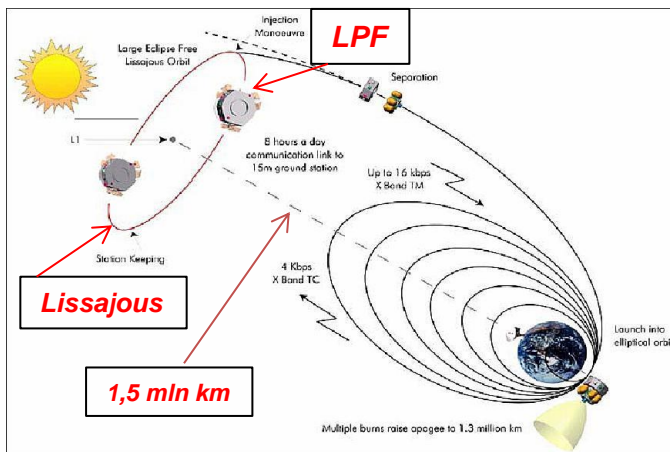
Krzywizny czasoprzestrzeni Słońce – Ziemia
wg. t. A. Einsteina



Orbita Lissajous wg. t. I. Newtona



Odległość L_1 – Z wynosi ok. $1,5 \cdot 10^6$ km



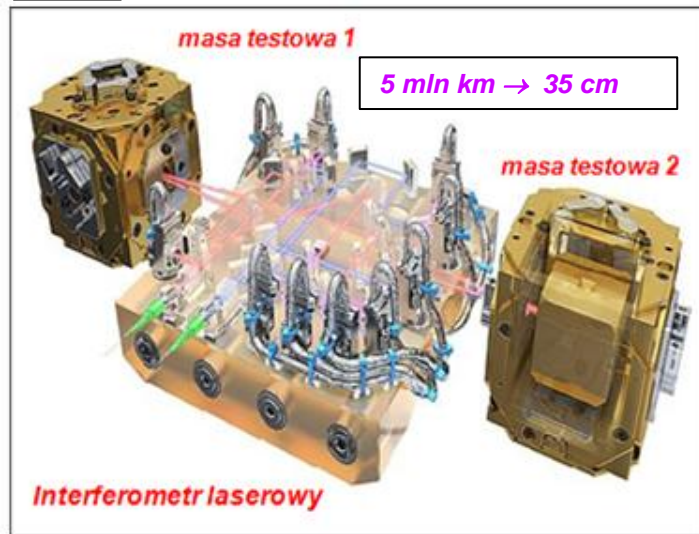
Urządzenia LPF: LTP (ESA) i DRS (NASA) na okres trwania misji były umieszczone na orbicie Lissajous (wokół p. L_1)

Aparatura Misji LPF

Misja LPF (LISA PathFinder – Misja Pionierska) ESA - skład:

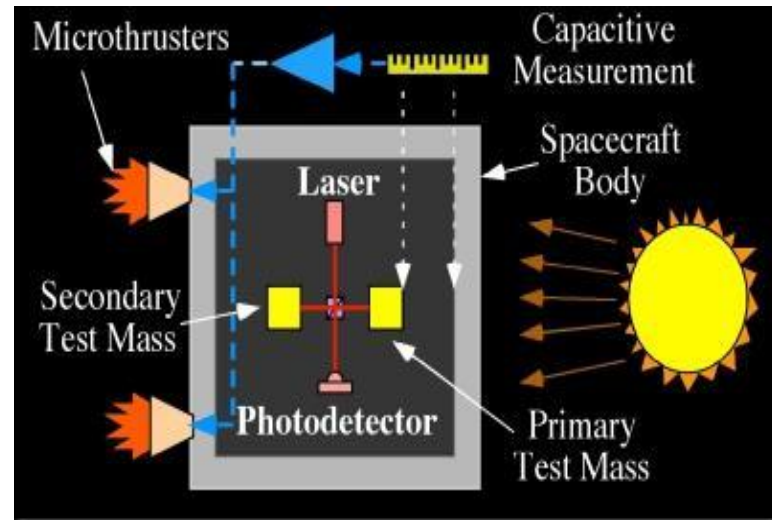
1. **LTP (LISA Technology Package) ESA**
2. **DRS (Disturbance Reduction System) NASA**

LTP



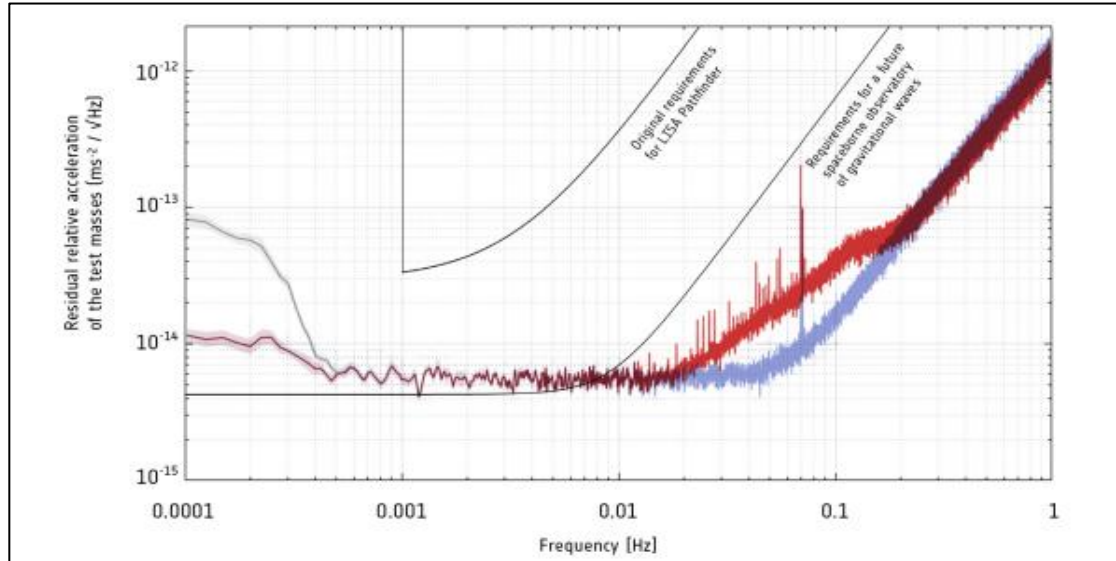
Precyzja pomiaru przemieszczeń swobodnych testowych mas interferometrem laserowym.

DRS



Redukcja wpływów zewnętrznych łącznie z ciśnieniem światła

Wyniki LPF



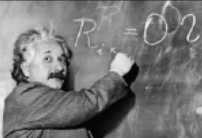
**Dotychczasowe pomiary wskazują na pełną możliwość rejestracji
GWD przyszłej misji LISA**

Niepewność pom. przyspieszeń [$10^{-14} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{1/2}$ @ (0,1 – 10) mHz]

„Dlaczego” ?


Cel budowy GWD

Fundamental questions that gravitational-wave observations can answer



Is general relativity the **correct theory of gravity**?
What is the nature of one of the **four fundamental forces**?

Powstają nowe GWD w różnych krajach.



University of Glasgow

Gravitational Wave Astronomy

Opening a New Window on the Universe

Martin Hendry

Institute for Gravitational Research and Astronomy & Astrophysics Group
SUPA, School of Physics and Astronomy, University of Glasgow

[15]

Istnieją projekty GWD w kosmosie: LISA i eLISA

**„Gravitational Waves will allow us to ‘hear’ a Universe otherwise invisible with light”
Karsten Danzmann „The Gravitational Universe”**

[15] M. Hendry (University of Glasgow) „Gravitational Wave Astronomy” School of Physics and Astronomy, Warwick (Aug. 2013)

GOTO - The Gravitational-wave Optical Transient Observer



GOTO – Teleskop uruchomiono w Warwick - Obserwatorium Astronomicznym na Wyspach Kanaryjskich w dn. 3 lipca 2017

Misja Teleskopu GOTO: Automatyczne wyszukiwanie i rejestrowanie optycznych sygnatur związanych z generacją GW wykrywanych np. przez LIGO. Jego działanie będzie synchronizowane sygnałami z detektorów GW.

Dziękuję za uwagę