

Ewolucja Wszechświata

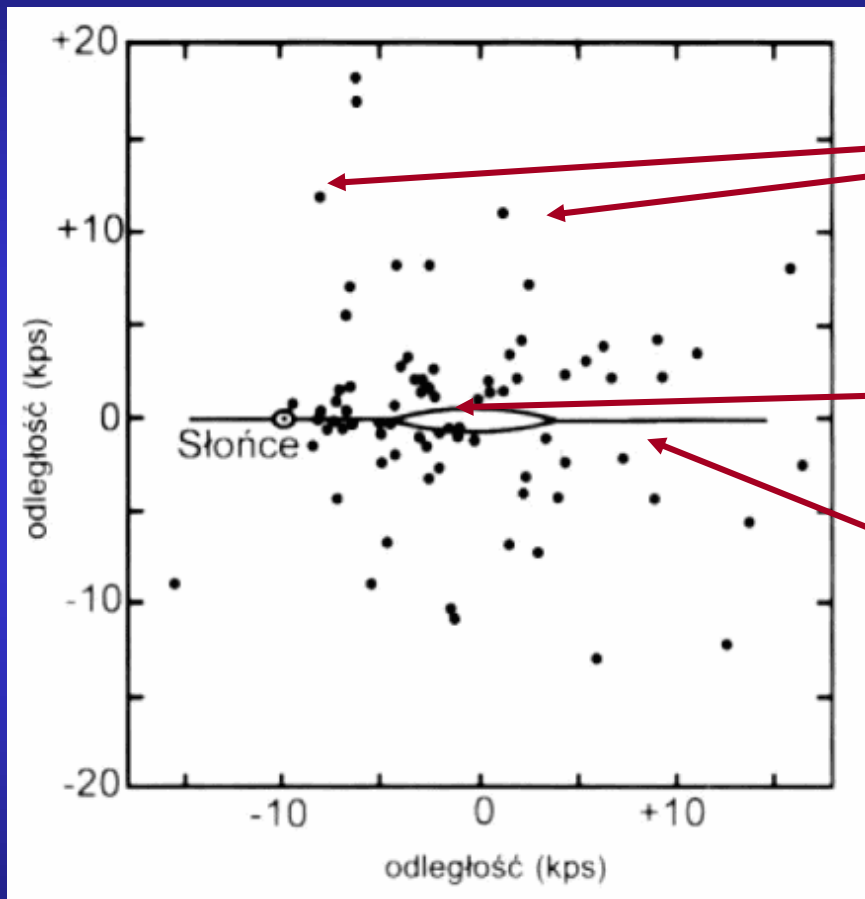
Wykład 13

Czarne dziury c.d.

Fale grawitacyjne

Ewolucja Drogi Mlecznej

Droga Mleczna – galaktyka spiralna 100 miliardów gwiazd:



Gwiazdy II populacji w gromadach (liczących do miliona gwiazd)

Gwiazdy II populacji w centrum dysku

Gwiazdy I populacji w ramionach (np. Słońce zawierające 3% pierwiastków ciężkich).

Problem: dlaczego nawet w najstarszych gwiazdach występują pierwiastki ciężkie (100 razy mniej niż w Słońcu)?

Ewolucja Drogi Mlecznej

W momencie oddzielenia się promieniowania od materii (380 000 lat) zagęszczenia materii zaczęły zapadać się pod wpływem grawitacji.

Warunkiem było przekroczenie masy krytycznej (masy Jeansa).

W momencie rekombinacji temperatura wynosiła około 1000 K, gęstość - około 10^{-21} g/cm³, a masa Jeansa - mniej więcej milion mas Słońca.

Najbardziej prawdopodobne były zagęszczenia o mniejszych rozmiarach, więc powstające obiekty najczęściej miały masę niewiele przekraczającą masę Jeansa.

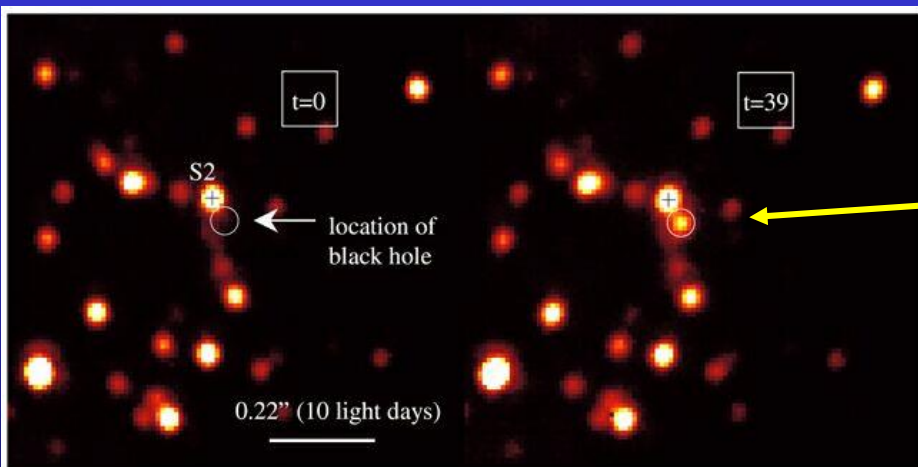
Jak więc powstała Droga Mleczna, która jest 100 000 razy większa?

Ewolucja Drogi Mlecznej

Rozwiązanie problemów może przynieść uwzględnienie roli czarnej dziury w ewolucji galaktyki.

Z przeprowadzonych badań ruchu gwiazd wyraźnie wynika, że w jej środku znajduje się czarna dziura o masie około 2,6 miliona mas Słońca.

↑
Wartość bliska masie Jeansa

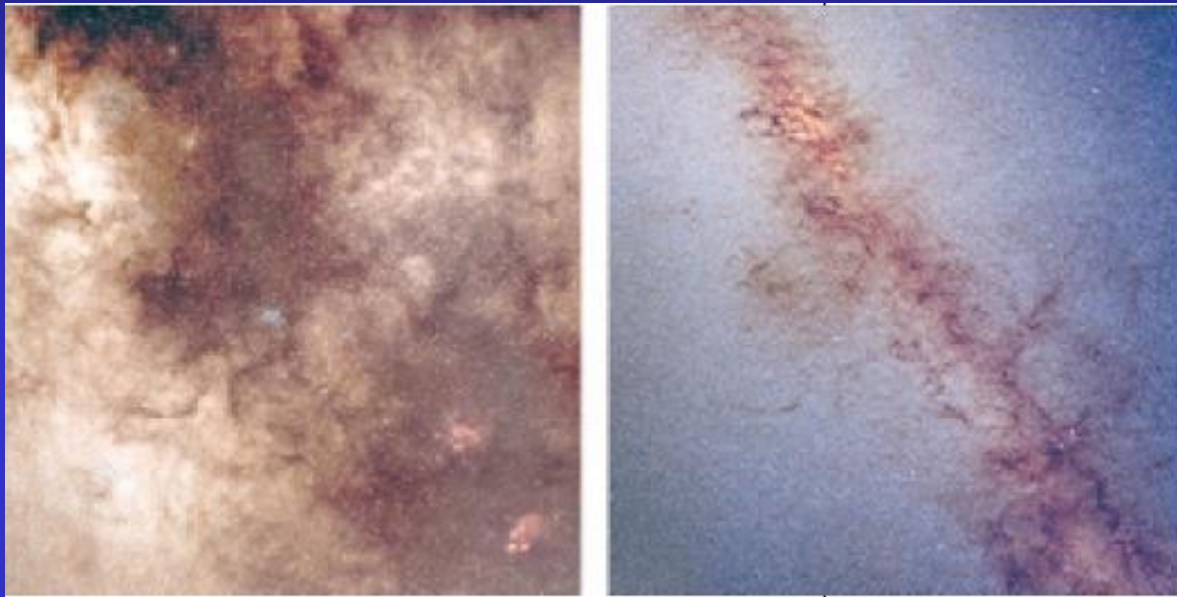


Near-IR Flare from Galactic Centre (VLT YEPUN + NACO)

9 maja 2003 w Paranal Observatory w Chile zaobserwowano silny rozbłysk w podczerwieni trwający kilka minut z centrum Galaktyki z miejsca odległego o kilka godzin świetlnych od czarnej dziury. Pochodzi on z fragmentu materii zbliżającego się do horyzontu zdarzeń.

Czarna Dziura w centrum Drogi Mlecznej

Obłoki pyłu i gazu w centrum Drogi Mlecznej



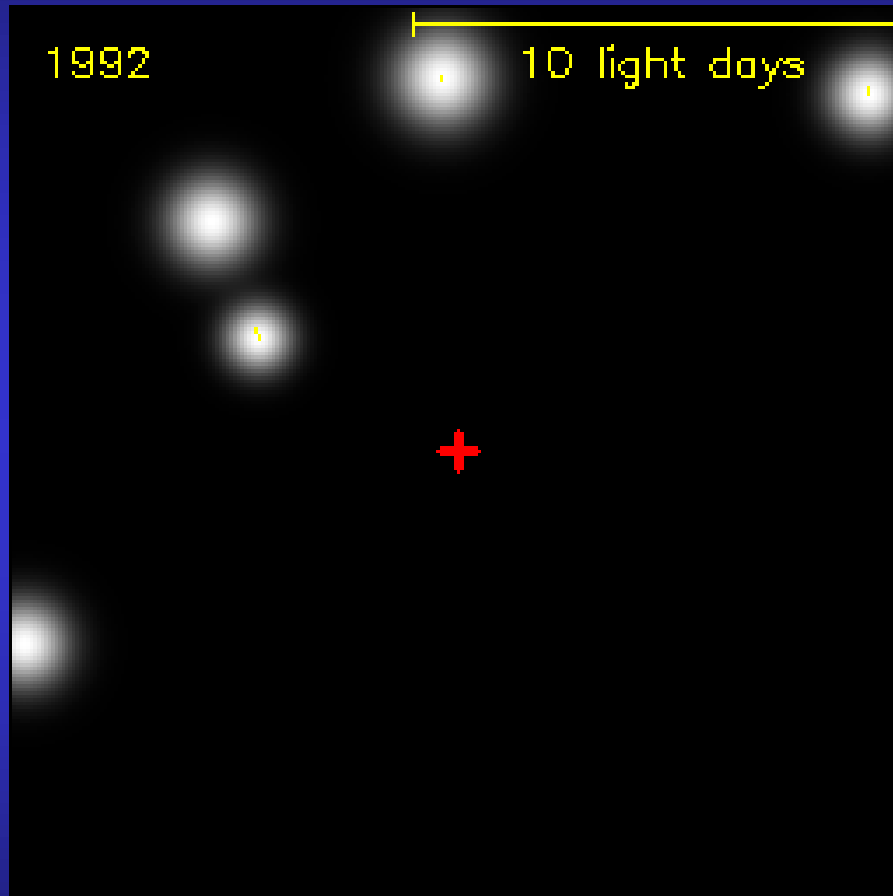
w świetle widzialnym

w podczerwieni

W centrum Galaktyki odkryto źródło promieniowania radiowego Sag*

Obserwacje prowadzono w podczerwieni za pomocą teleskopów NTT i VLT, należącymi do European Southern Observatory, ulokowanych na pustyni Atacama, w Andach w północnej części Chile

Czarna Dziura w centrum Drogi Mlecznej



Zdjęcia gwiazd w centrum Galaktyki wykonywane w ciągu kilkunastu lat.

Orbity gwiazd to keplerowskie elipsy z ogniskiem w centrum Drogi Mlecznej.

W obszarze o rozmiarach kilkunastu godzin świetlnych (kilka Układów Słonecznych) zawarta jest masa około 3 mln mas Słońca.

Ewolucja Drogi Mlecznej

Czarne dziury powszechnie występują w centrach galaktyk.

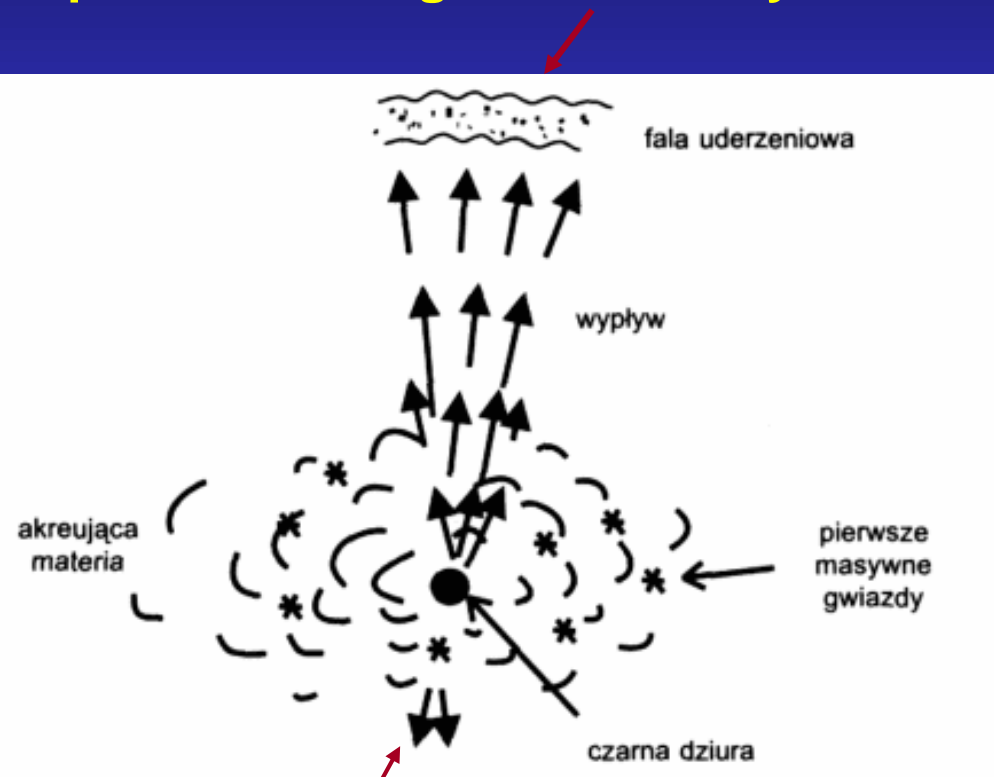
Masy czarnych dziur są zwykle kilkaset razy mniejsze niż masa zagęszczenia centralnego.

Możliwy scenariusz:

- Z pierwotnego zagęszczenia tworzy się masywna czarna dziura.
- Z otaczającej materii formuje się dysk akrecyjny
- Masa czarnej dziury rośnie, ale opadaniu materii przeciwdziałają ciśnienie promieniowania
- Wokół czarnej dziury gromadzi się materia protogalaktyczna

Ewolucja Drogi Mlecznej

Fala uderzeniowa sprzyja powstawaniu gromad kulistych.



Dżety wyrzucają w przestrzeń międzygalaktyczną materię zawierającą pierwiastki ciężkie.

Materia w płaszczyźnie galaktyki może być na tyle gęsta, że staje się nieprzezroczysta dla promieniowania z okolic czarnej dziury i tworzy rodzaj grubego, gęstego dysku.



W dysku zachodzą gwałtowne procesy gwiazdotwórcze. Część gwiazd powstających w dysku ewoluje szybko i wybucha jako supernowe, wzbogacając materię protogalaktyki w pierwiastki ciężkie.

Ewolucja Drogi Mlecznej

Gdy czarna dziura zużyje materię znajdującą się w jej pobliżu, akrecja zanika. Czarna dziura przechodzi w stan uśpionia, jak to ma miejsce obecnie w Drodze Mlecznej.

Etapy życia Drogi Mlecznej

- Fala dźwiękowa w epoce przed rekombinacją.
- Czarna dziura o masie 10^6 mas Słońca.
- Wzrost czarnej dziury i formowanie się otaczającej ją protogalaktyki, powstawanie gromad kulistych w halo.
- Wstrzymanie aktywności centralnej w momencie osiągnięcia przez czarną dziurę obecnej wartości masy $2,6 \times 10^6$ mas Słońca i utworzenie gwiazd zgęszczenia centralnego.
- Ewolucja gwiazd w dysku galaktycznym.
- Starzenie się Galaktyki (przyszłość).

Ewolucja Drogi Mlecznej

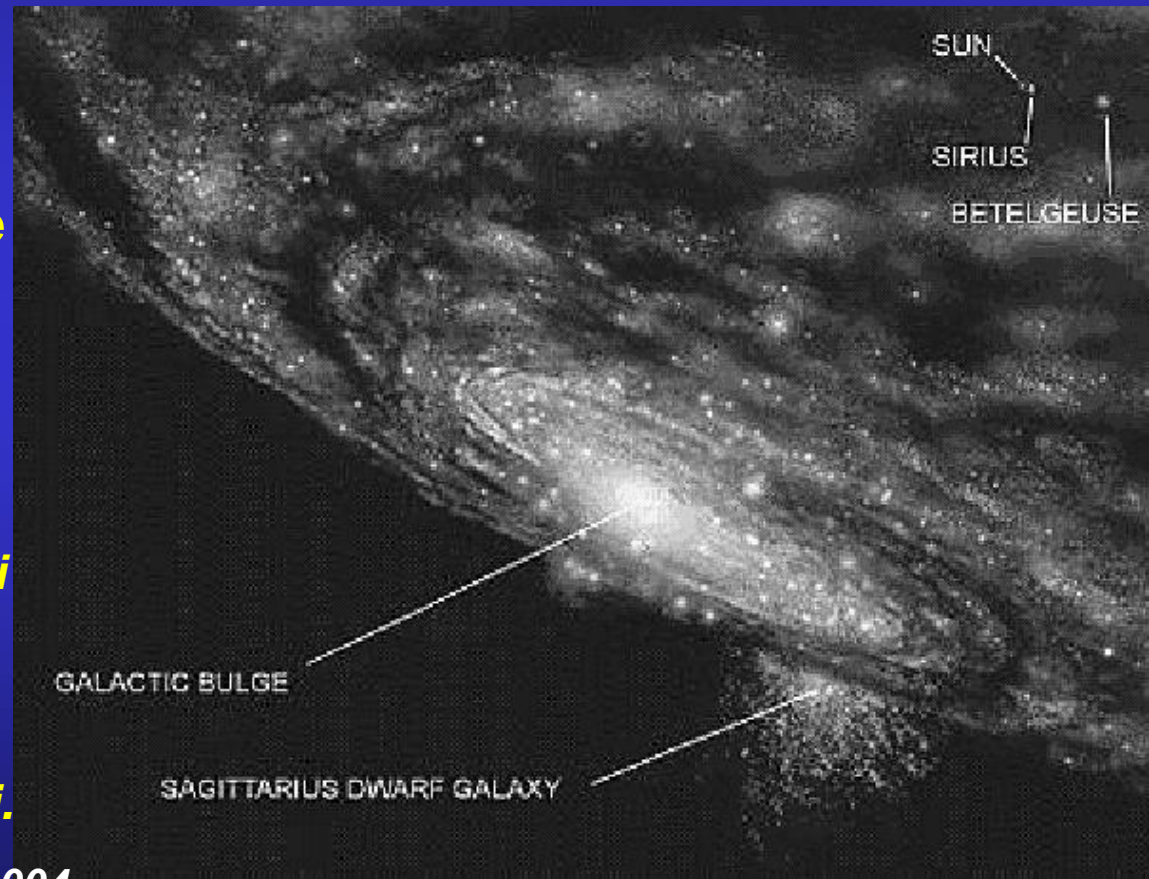
Droga Mleczna osiągnęła prawdopodobnie swoje rozmiary przez wchłanianie mniejszych galaktyk.

Dowody obserwacyjne:

Odkrycie w 1994 r. galaktyki karłowatej w gwiazdozbiorze Strzelca (*Sagittarius Dwarf Elliptical* — Sgr dE*).

Ze względu na dużą ilość pyłu i materii międzygwiazdowej, odkrycie to było możliwe dopiero po analizie obserwacji prowadzonych w podczerwieni.

Krzysztof Helminiak, Urania 4, 2004



Ewolucja Drogi Mlecznej

W roku 1996 odkryto strumień gwiazd wyrwanych z Sgr dE prawdopodobnie przez siły pływowe Galaktyki.



Pierwsza wskazówka, że Droga Mleczna pochłania materię innej galaktyki.

Modele teoretyczne przewidywały istnienie całego pierścienia gwiazd i materii pochodzącej z Sgr dE, opasującego Galaktykę.

Pierścień ten udało się zaobserwować w roku 1998.

Pierścień został utworzony podczas kilku obiegów Sgr dE wokół centrum Galaktyki .

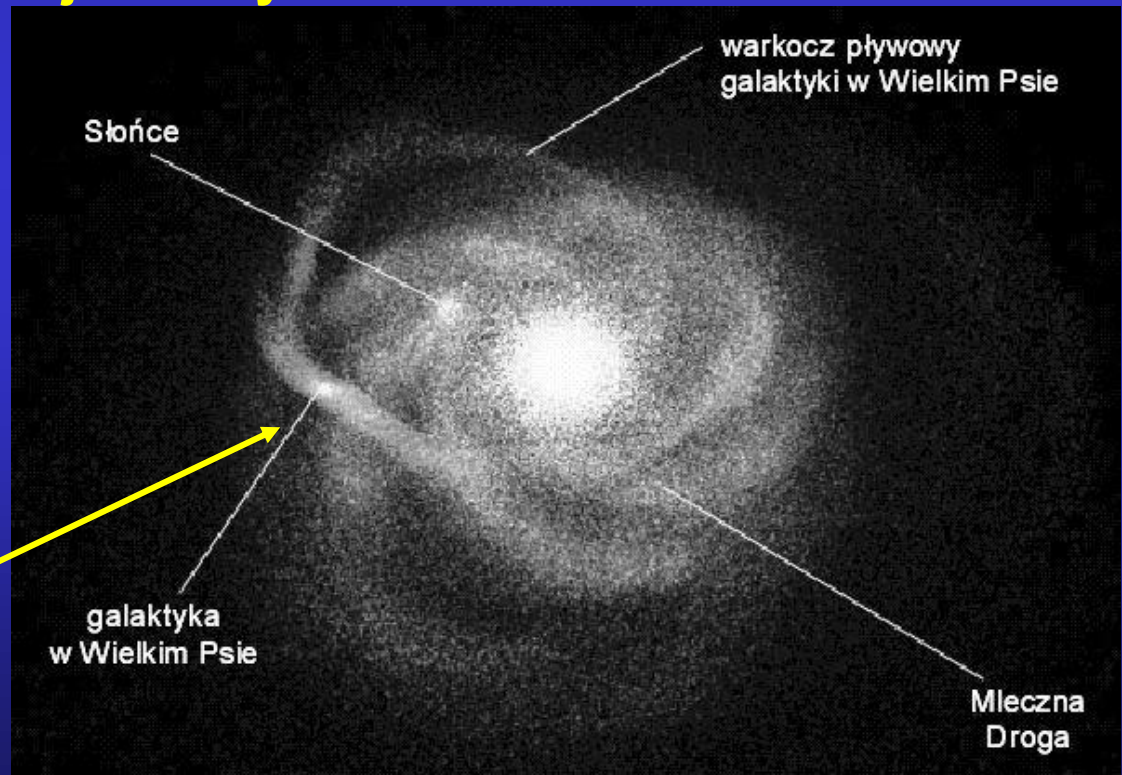
Krzysztof Hełminiak, Urania 4, 2004

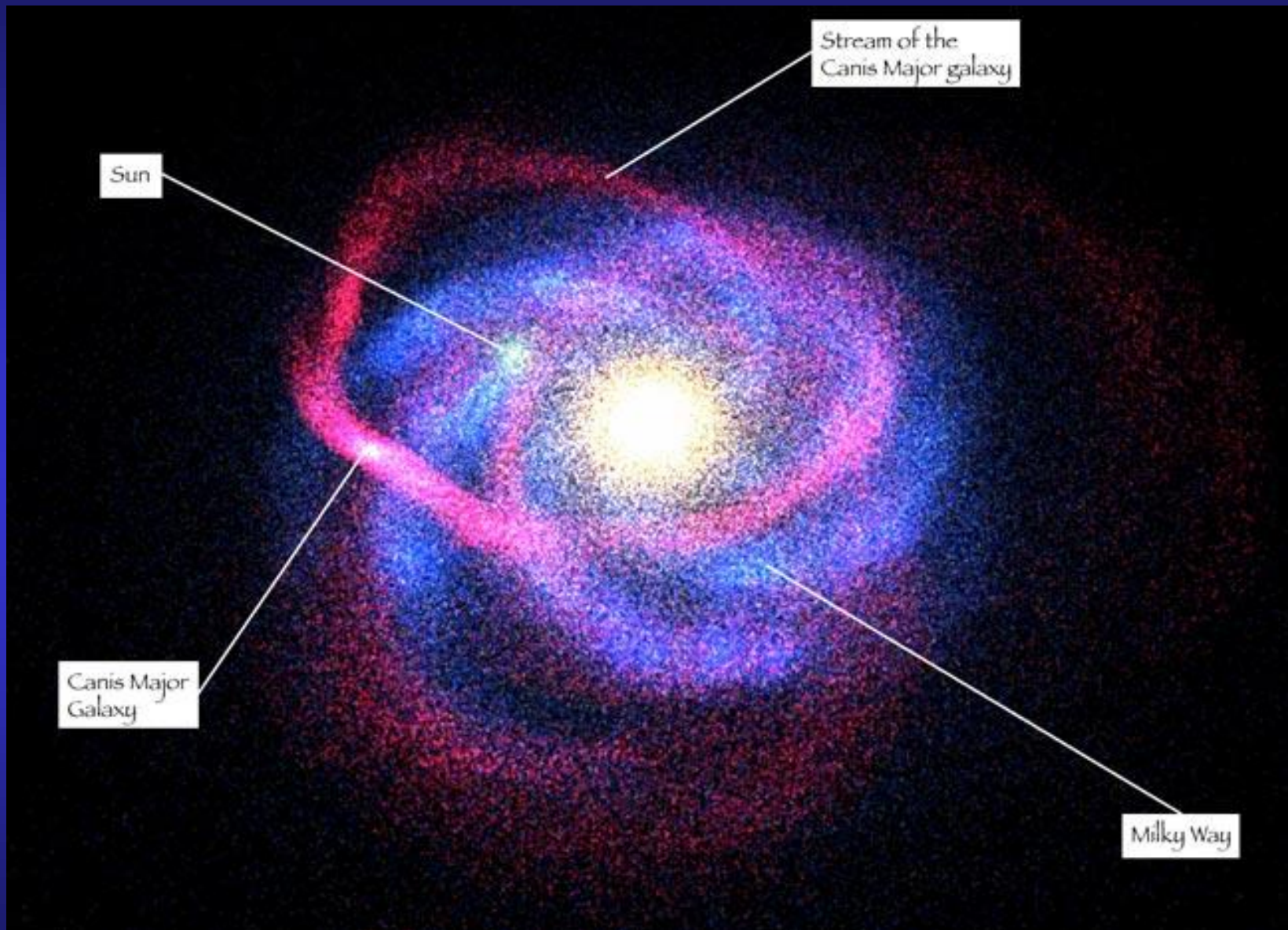
Ewolucja Drogi Mlecznej

W roku 2002 pojawiła się hipoteza, że odkryta struktura w kształcie pierścienia otaczającego Drogę Mleczną była strumieniem materii wyrwanym przez siły pływowe z galaktyki satelitarnej, której orbita leży w płaszczyźnie zbliżonej do płaszczyzny dysku naszej Galaktyki.

Tę hipotezę potwierdziła w listopadzie 2003 roku grupa astronomów z Francji, Włoch, Wielkiej Brytanii i Australii.

Nowo odkryta galaktyka, rozrywana i wchłaniana przez Drogę Mleczną.





Ewolucja Drogi Mlecznej

Według niektórych ocen masa materii zabranej tej galaktyce może stanowić nawet 1% masy Drogi Mlecznej. Prowadzi to do wniosku, że nasza Galaktyka nie jest „w średnim wieku”, lecz cały czas się tworzy.

Nasza macierzysta Galaktyka nie jest spokojną, kręcącą się „wyspą w Kosmosie”, ale tworem dynamicznym, który cały czas się rozrasta poprzez „kosmiczny kanibalizm”

Podobnie inne galaktyki: obserwujemy przykłady rozrywania galaktyk, wsysania gwiazd i materii czy akrecji gazu na dysk.

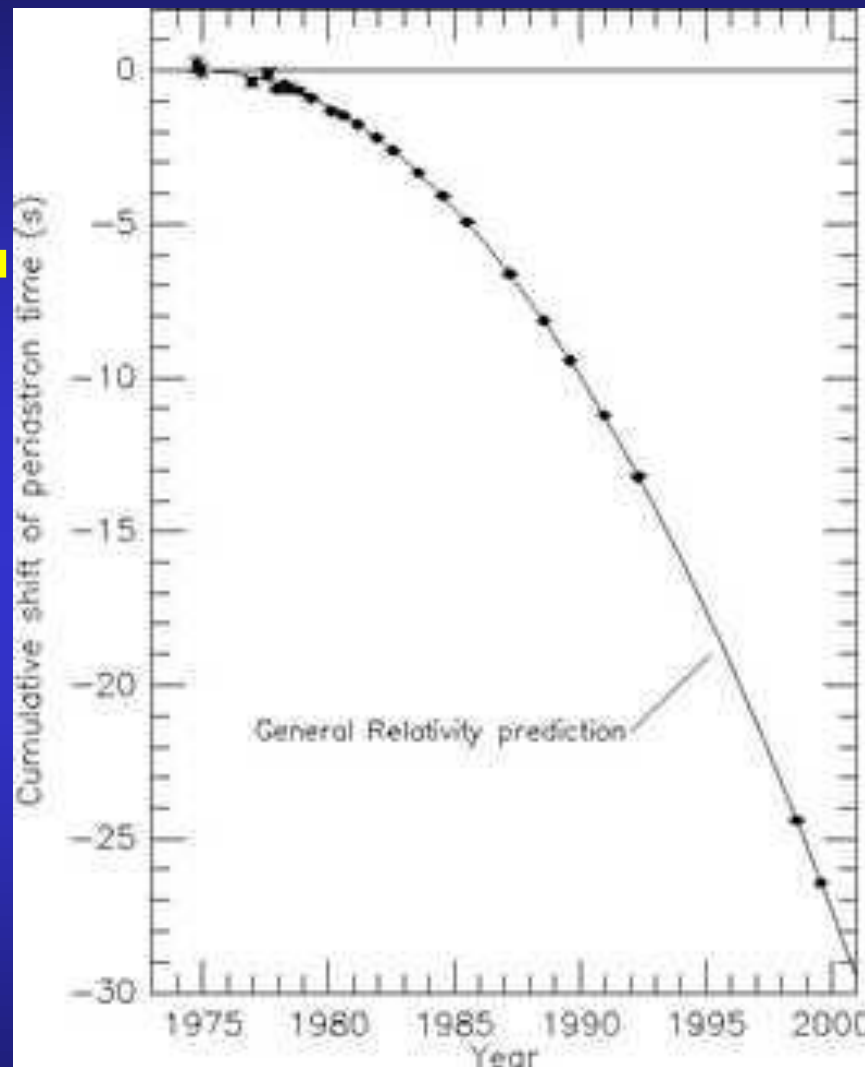
Krzysztof Helminiak, Urania 4, 2004

Fale grawitacyjne

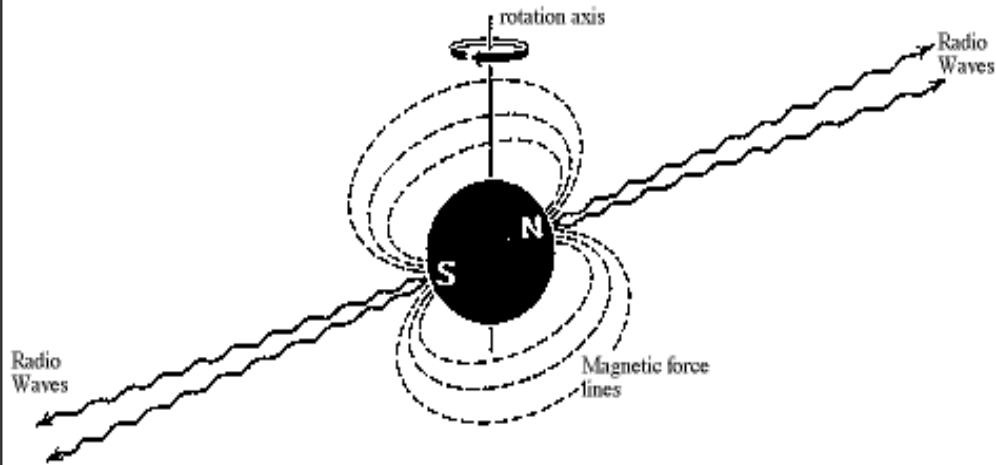
Na początku lat siedemdziesiątych zeszłego wieku Russel Hulse i Joseph Taylor z Princeton University zaobserwowali zmniejszanie się okresu orbitalnego (zacieśnianie orbity) podwójnego układu gwiazd neutronowych zawierającego pulsar PSR B1913+16

Zmierzone tempo skracania się okresu odpowiadało wyliczonemu z ogólnej teorii względności - dowód na istnienie fal grawitacyjnych.

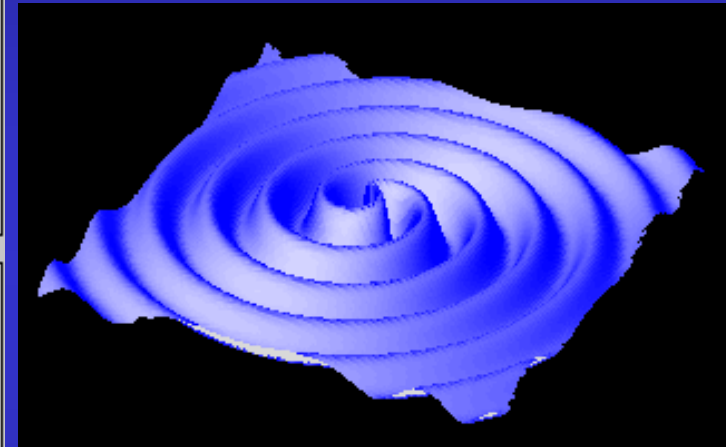
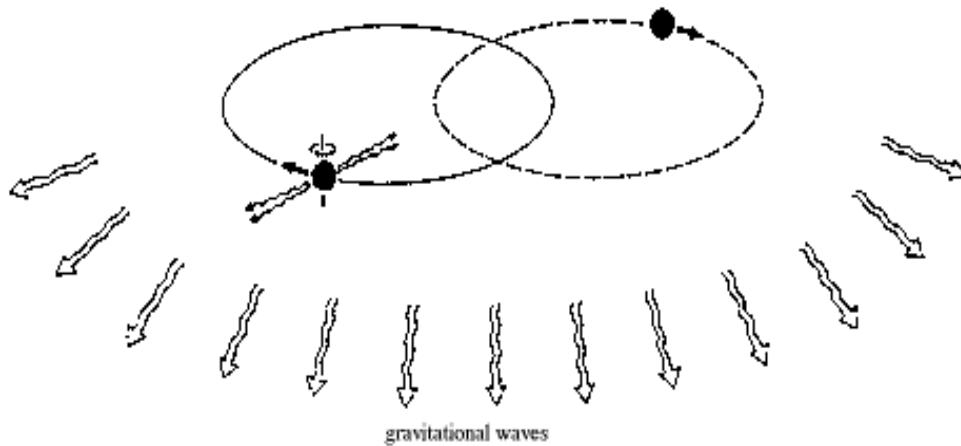
Nagroda Nobla w 1993 r.



Pulsar



Binary pulsar



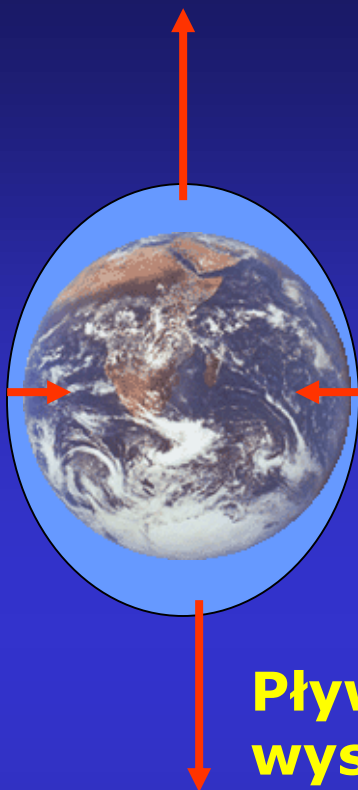
Fale grawitacyjne

Zderzenie dwóch czarnych dziur powoduje emisję fal grawitacyjnych (animacja).

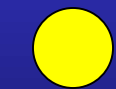


Fale grawitacyjne

Oscylujące ściskanie i rozciąganie w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali



Pływy o
wys. 1 m



Księżyc

Pływy o wys. 10^{-14} m
(10^{-21} średnicy Ziemi)



Fale
grawitacyjne



Fale grawitacyjne

Natężenie fal grawitacyjnych maleje wraz z odległością.

W pobliżu źródła fal względna zmiana długości:

$$\frac{\Delta x}{x} \approx 1$$

Gdy fala dotrze do Ziemi:

$$\frac{\Delta x}{x} \approx \frac{1/30 OD}{d}$$

Obwód dziury

Odległość od Ziemi

Dla czarnej dziury o masie ~ 10 mas Słońca i odległej o miliard lat świetlnych:

$$\frac{\Delta x}{x} \approx 10^{-21}$$

Fale grawitacyjne

Jeśli długość przyrządu pomiarowego wynosi 2 km, to trzeba wykryć zmiany długości rzędu $2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-21} \text{m} = 2 \cdot 10^{-18} \text{m}$ (1/1000 średnicy protonu)

Po co fale grawitacyjne?

W latach trzydziestych XX w. cała wiedza o Wszechświecie pochodziła z obserwacji światła widzialnego.



Wszechświat wypełniony przez stałe w czasie gwiazdy i planety. Najjaśniejsze obiekty to Słońce, planety, najbliższe gwiazdy.

W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych obserwacje w falach radiowych i rentgenowskich zburzyły ten spokojny obraz.



Pojawiły się dzety wyrzucane z jąder galaktyk, kwazary o jasności zmiennej i większej niż jasność naszej Galaktyki, pulsary i magnetary.

Pomiar fal grawitacyjnych może przynieść jeszcze większą rewolucję!



Po co fale grawitacyjne?

Jakie informacje mogą przynieść fale grawitacyjne?

Fale grawitacyjne **powinny być najsilniej emitowane przez wielkoskalowe spójne drgania krzywizny czasoprzestrzeni...**

- zderzenie i połączenie dwóch czarnych dziur
- ...oraz przez wielkoskalowe spójne ruchy ogromnych mas**
- implozja jądra gwiazdy (wybuch supernowej)
- zbliżanie się do siebie ruchem spiralnym 2 gwiazd neutronowych

Informacja o ruchach wielkich krzywizn i mas

Fale elektromagnetyczne emitowane przez pojedyncze atomy i elektrony – informacja o temperaturze, gęstości i polach magnetycznych, które wpływają na atomy i elektrony.

Po co fale grawitacyjne?

Fale grawitacyjne są najsilniej emitowane w obszarach, gdzie opis newtonowski zawodzi (ogromne masy i krzywizny czasoprzestrzeni poruszające się z prędkościami relatywistycznymi):

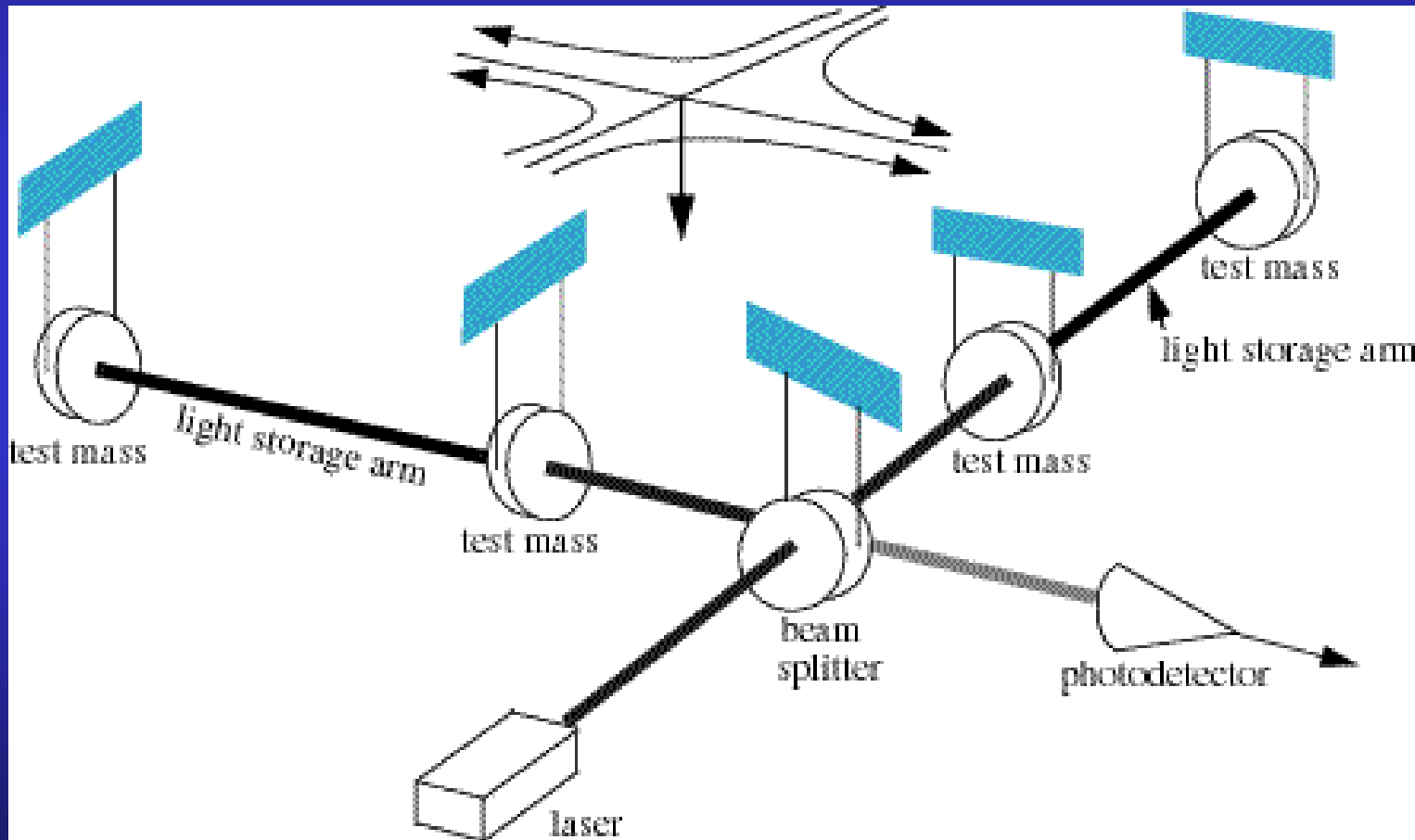
- Powstanie Wszechświata w Wielkim Wybuchu
- Zderzenia czarnych dziur
- Pulsowanie nowo powstałych gwiazd neutronowych

Fale elektromagnetyczne pochodzą z obszarów o niskiej grawitacji i małych prędkościach (powierzchnie gwiazd czy supernowych)

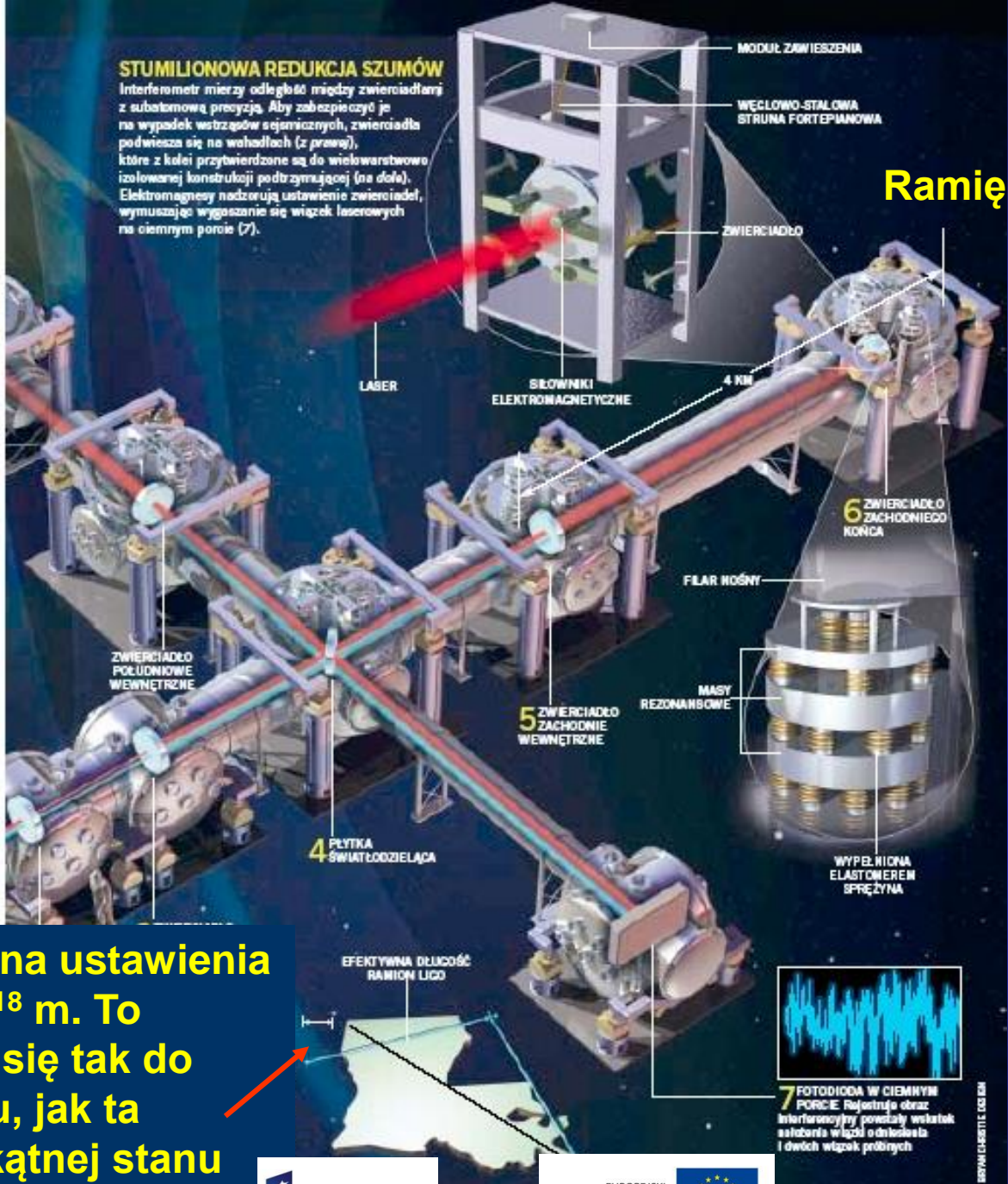
*Wszechświat grawitacyjny **powinien wyglądać zupełnie inaczej niż** Wszechświat elektromagnetyczny.*

LIGO

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory Hanford, Washington i Livingston, Louisiana



STUMILIONOWA REDUKCJA SZUMÓW
Interferometr mierzy odległość między zwierciadłami z subatomową precyzją. Aby zabezpieczyć je na wypadek wstrząsów sejsmicznych, zwierciadła podwiesza się na wahadłach (z prawej), które z kolei przytwierdzone są do wielowarstwowo izolowanej konstrukcji podtrzymującej (na dole). Elektromagnesy nadzorują ustawienie zwierciadeł, wymuszając wygaszanie się wiązek laserowych na ośmiym porcie (7).



Ramię południowe

Ramię zachodnie

Wiązka z lasera

Wykrywana zmiana ustawienia zwierciadeł $\sim 10^{-18}$ m. To przesunięcie ma się tak do rozmiarów atomu, jak ta strzałka do przekątnej stanu Luizjana (560 km)

EFEKTYWNA DŁUGOŚĆ RAMIENI ŁUCO



7 FOTODIODA W CIEMNYM PORCIE Rejestruje obraz interferencyjny powstały wskutek skłócenia wiązek o odległości 1 dwóch wiązek próbnych



Betonowy, czterokilometrowy tunel mieszczący zachodnie ramię, wznosi się na kilka metrów, niwelując zakrzywienie Ziemi. W tunelu biegnie stalowa rura, w której utrzymywana jest wysoka próżnia. W próżni będą wiązkami podczerwonego światła o mocy 20 tys. wskaźników laserowych.

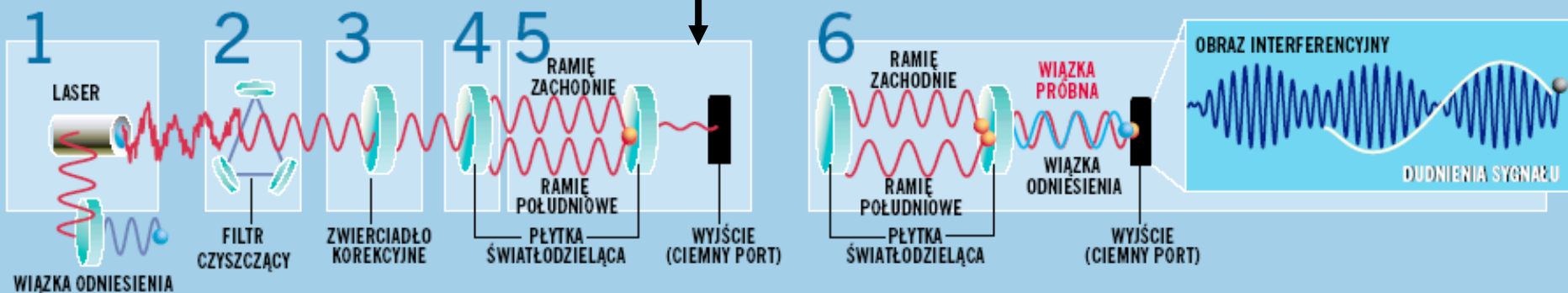


4. Płytką światłdzielącą rozdziela wiązkę na 2 części: pierwsza biegnie **do ramienia zachodniego**, druga po zmianie fazy na przeciwną **do południowego**.

2. Foton jest przepuszczany dalej, jeśli znajduje w części wiązki o odpowiednim kształcie i kierunku.

5. Obie wiązki odbijają się między końcowymi i wewnętrznymi zwierciadłami (280 obiegów) i w końcu spotykają się na płytce światłdzielącej, która posyła je na północ.

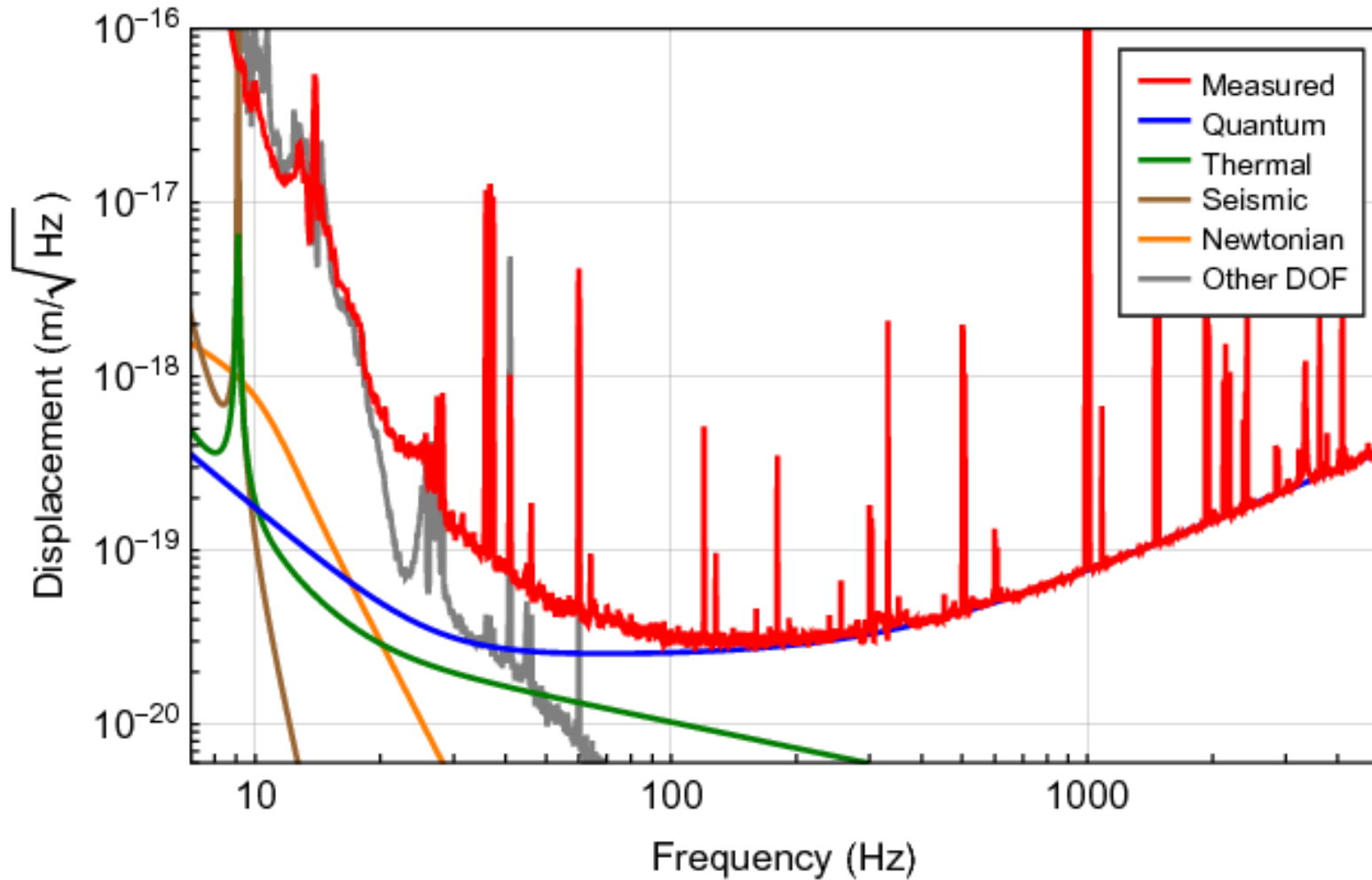
Brak fali grawitacyjnej- wygaszenie



Wiązka odniesienia o częstości nieco zmienionej

Fala grawitacyjna wydłuża jedno ramię i skraca drugie- wiązki interferują, razem z wiązką odniesienia dają dudnienia.

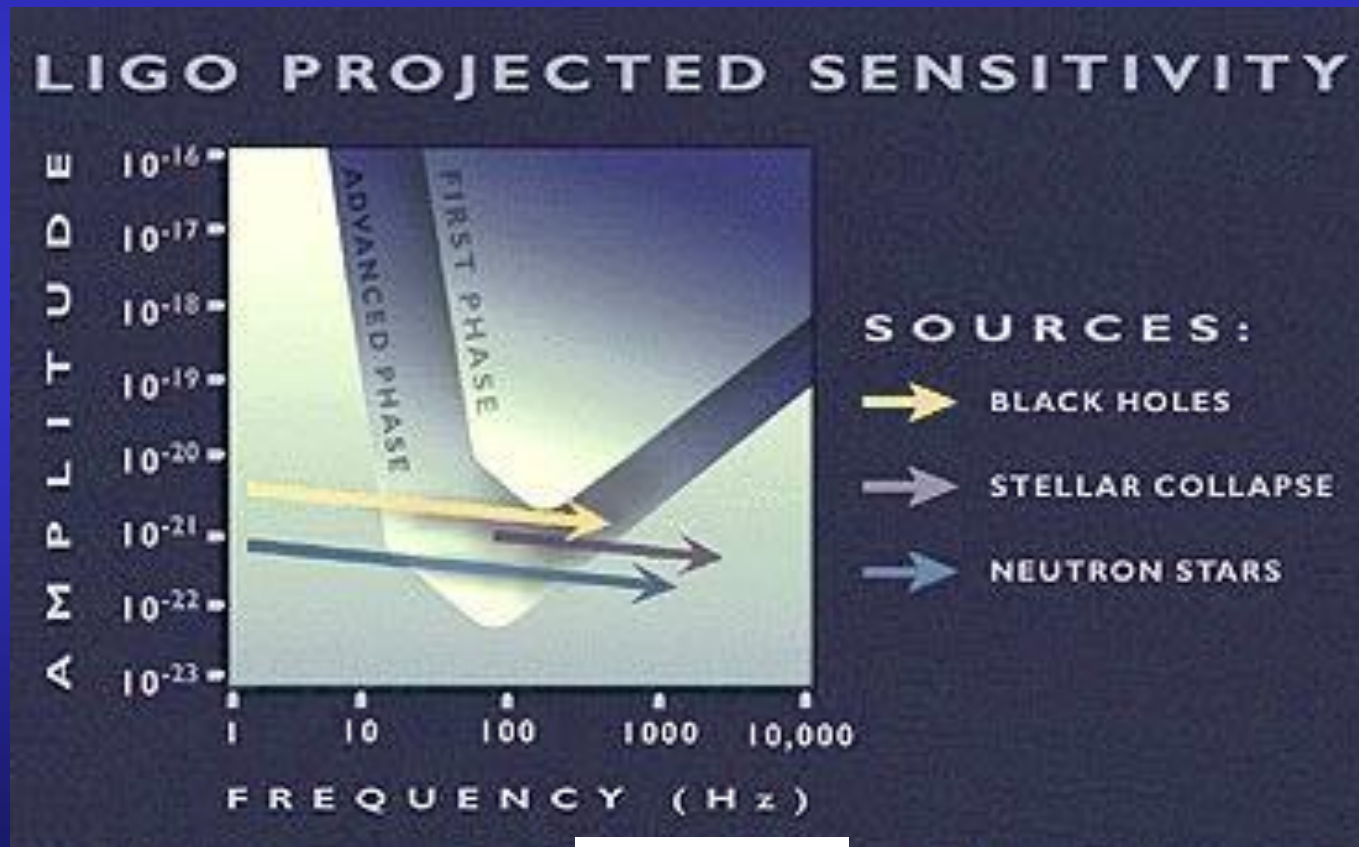
Szumy detektora



Detekcja fal grawitacyjnych

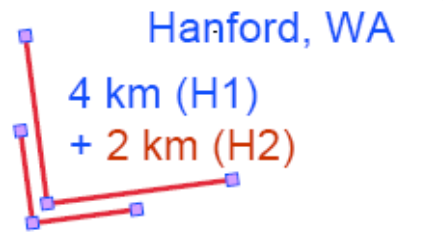
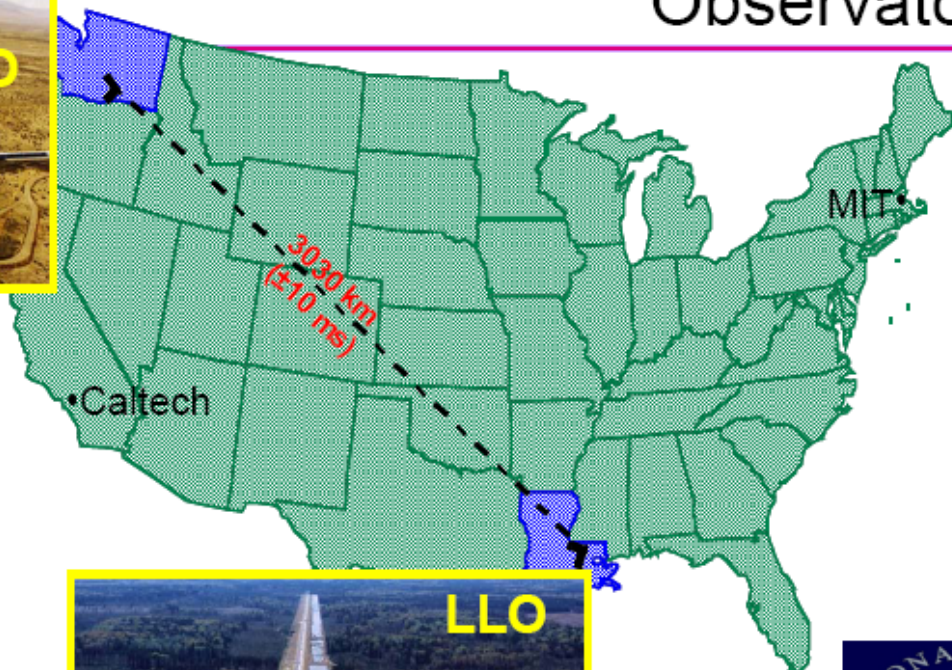
Działanie interferometrycznych teleskopów grawitacyjnych jest ograniczone przez nieustające ruchy skorupy ziemskiej (aktywność sejsmiczna, pływy, szum cywilizacyjny itd.) i poprzez bariery technologiczne (szumy termiczne instrumentu czy niedoskonałości optyki i laserów). Szczegółowe analizy źródeł szumów i zakłóceń pozwoliły określić najczulszy zakres działania teleskopów.

Największe szanse na detekcję będą miały fale grawitacyjne o częstotliwościach od około kilkudziesięciu do kilkuset herców.



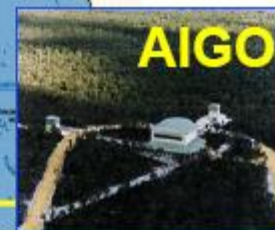
LIGO

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory





Global network of detectors



- Simultaneous detection (within msec)
- Detection confidence
- Sky location
- Source polarization
- Verify light speed propagation



IDENTYFIKACJA ŹRÓDEŁ

W czasie gdy sygnał grawitacyjny omiata Ziemię, ta sama fala (zielony) dociera do każdego z detektorów w nieco innym czasie. Pozwala to astronomom na lokalizację źródła i wyeliminowanie pozostałych możliwych przyczyn wibracji.

LIGO

INWESTOR: USA

DŁUGOŚĆ RAMION: 4 km

w Livingston, 4 km

i 2 km w Hanford

CZUŁOŚĆ MAKSYMALNA:

3×10^{-23} przy 180 Hz

TAMA 300

(NIE POKAZANA)

INWESTOR: Japonia

DŁUGOŚĆ RAMION: 300 m

CZUŁOŚĆ MAKSYMALNA:

5×10^{-21} w zakresie

700–1000 Hz

GEO 600

INWESTORZY: Wielka

Brytania, Niemcy

DŁUGOŚĆ RAMION: 600 m

CZUŁOŚĆ MAKSYMALNA:

8×10^{-23} przy 600 Hz

VIRGO

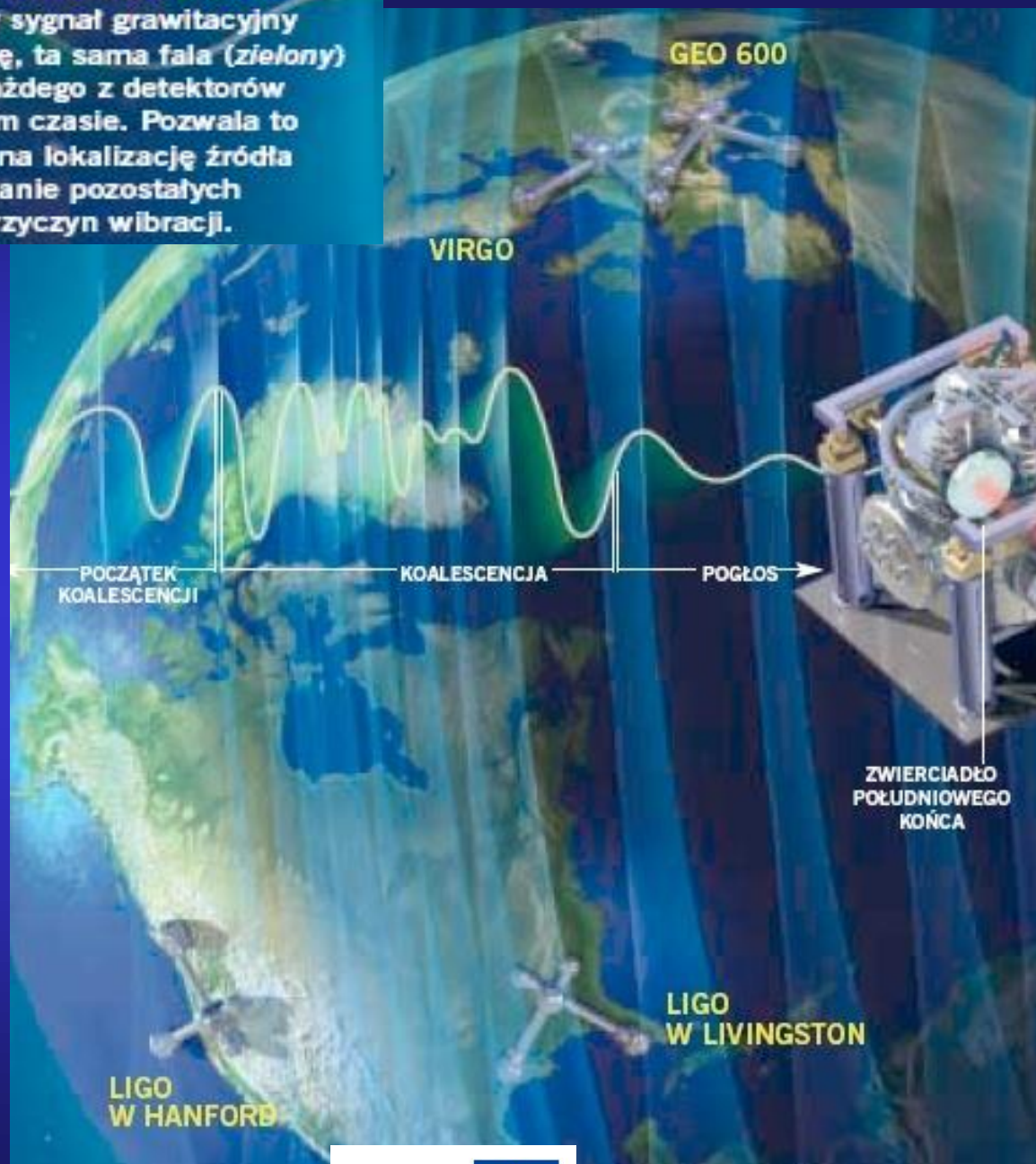
INWESTORZY: Włochy,

Francja

DŁUGOŚĆ RAMION: 3 km

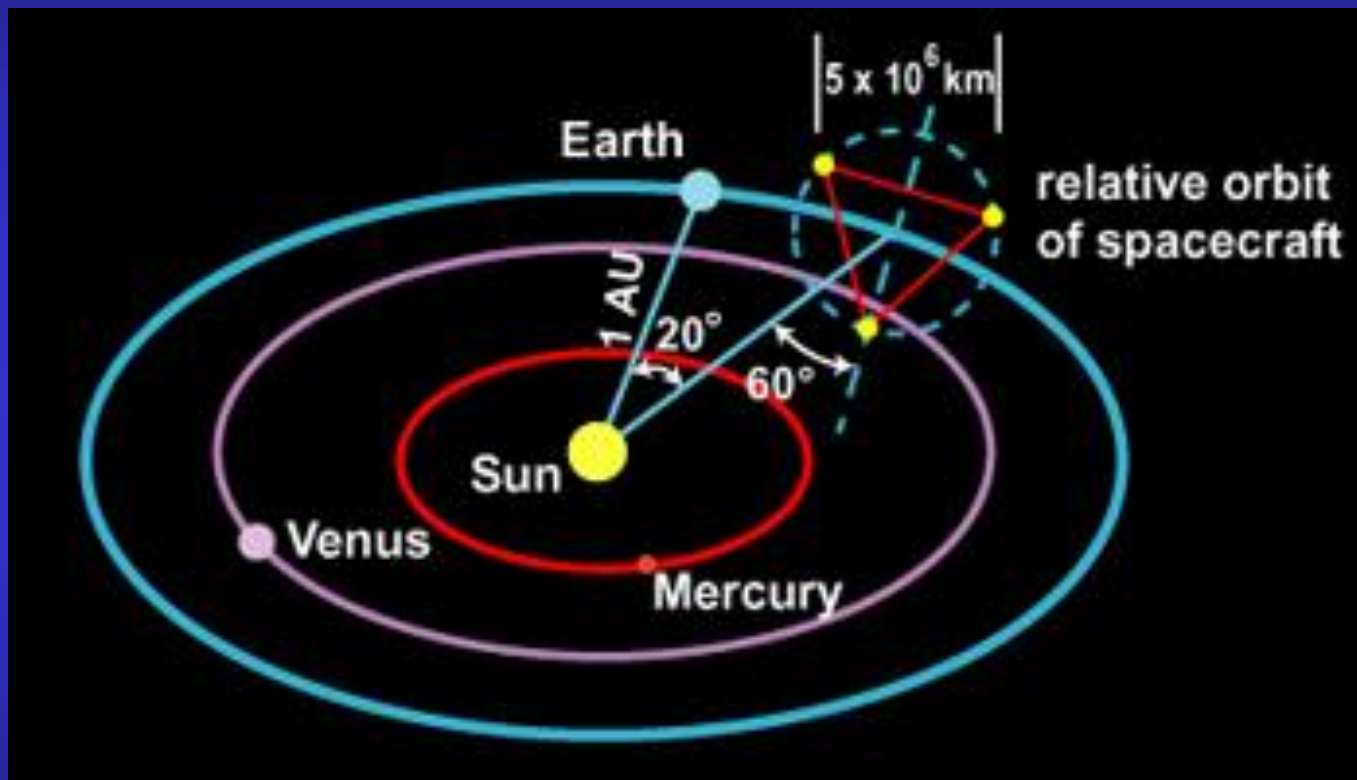
CZUŁOŚĆ MAKSYMALNA:

10^{-22} przy 500 Hz



LISA

Laser Interferometer Space Antenna

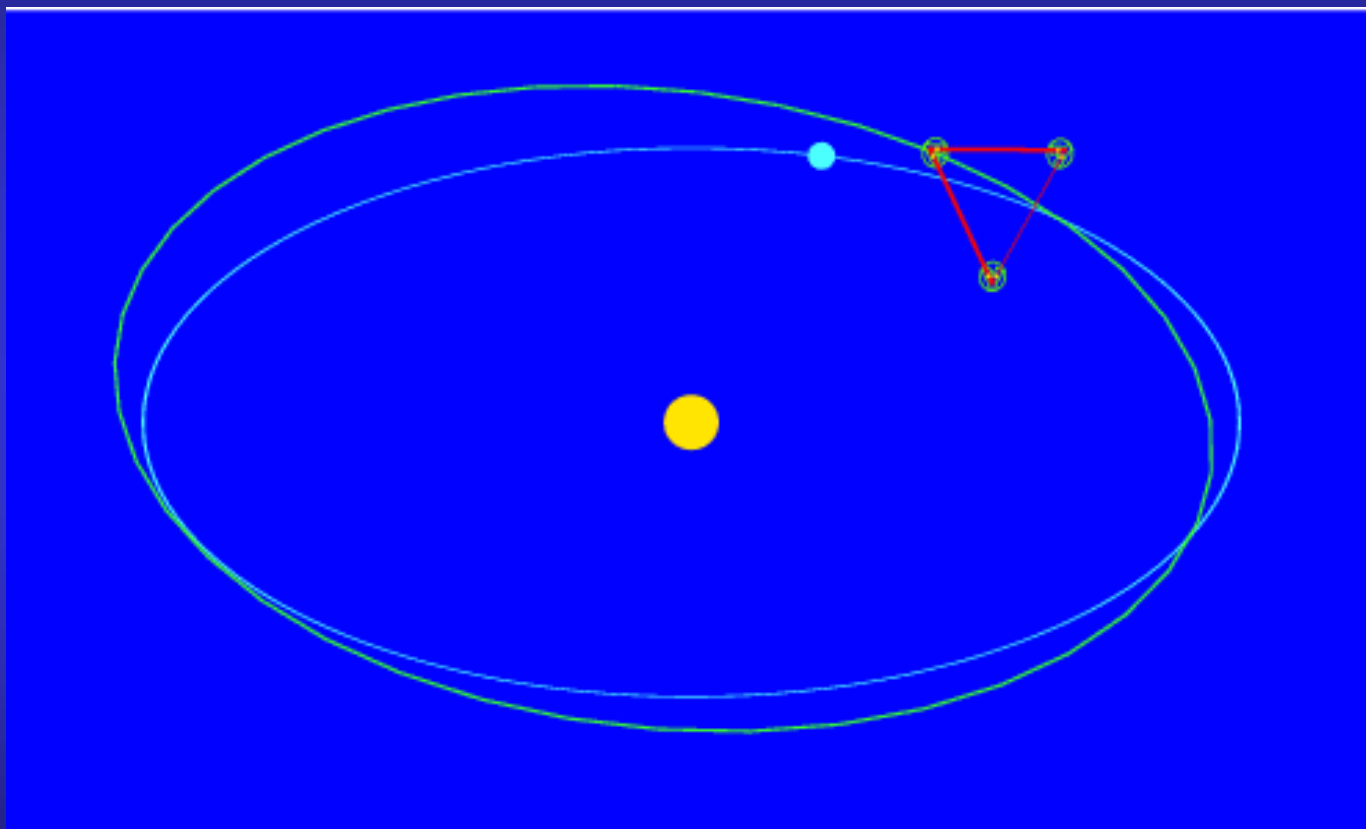


3 satelity na orbicie wokół Słońca

Lisa będzie czuła na fale o małej częstotliwości, nieosiągalne dla detektorów naziemnych – obserwacje podwójnych czarnych dziur tysiące lat przed zderzeniem.

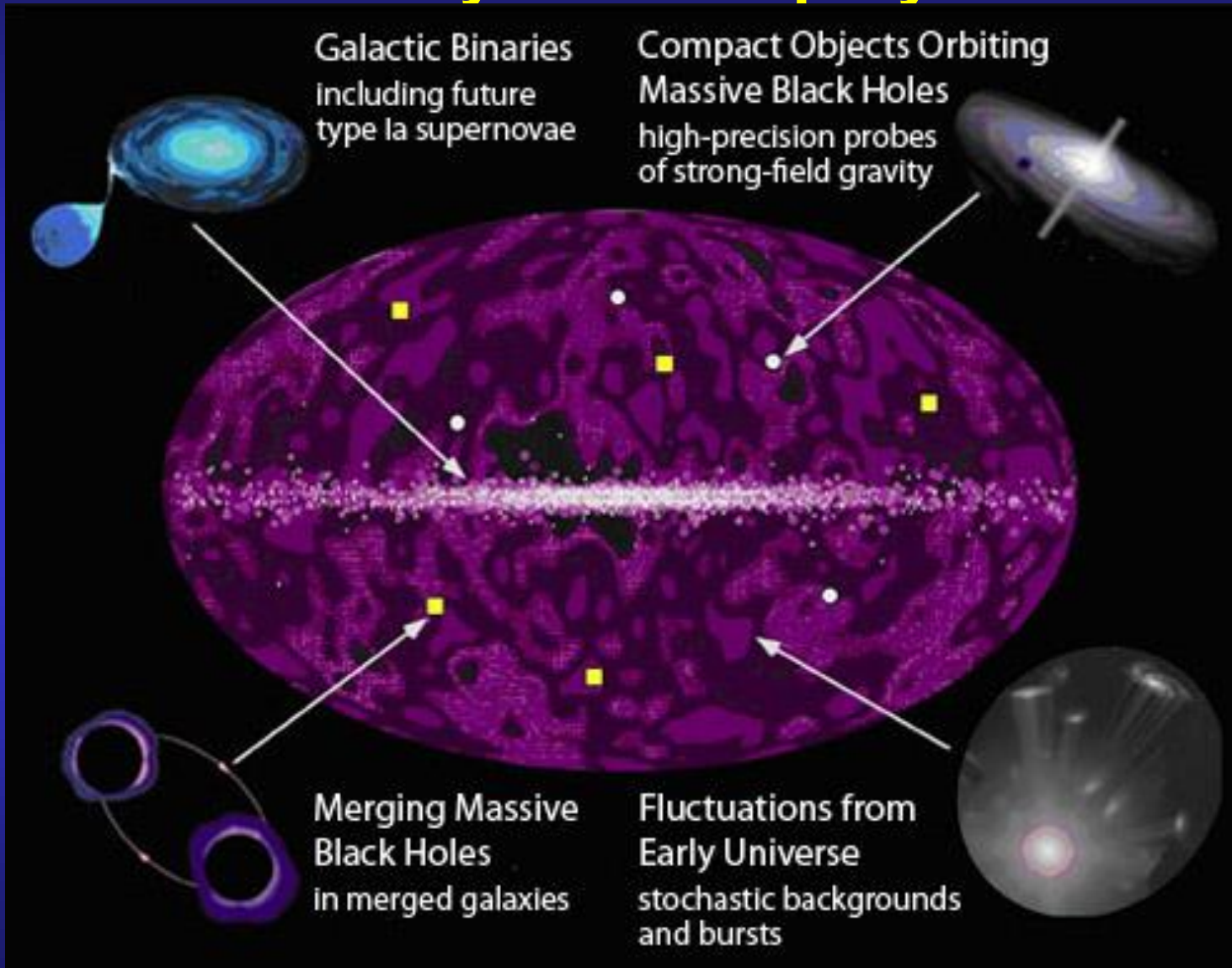
LISA

Orbity wybrane tak, aby zminimalizować zmiany odległości między satelitami



Rotacja zespołu LISA będzie użyteczna do określenia kierunku obserwowanych fal

Źródła fal grawitacyjnych możliwe do odkrycia w eksperymencie LISA



animacja
↑

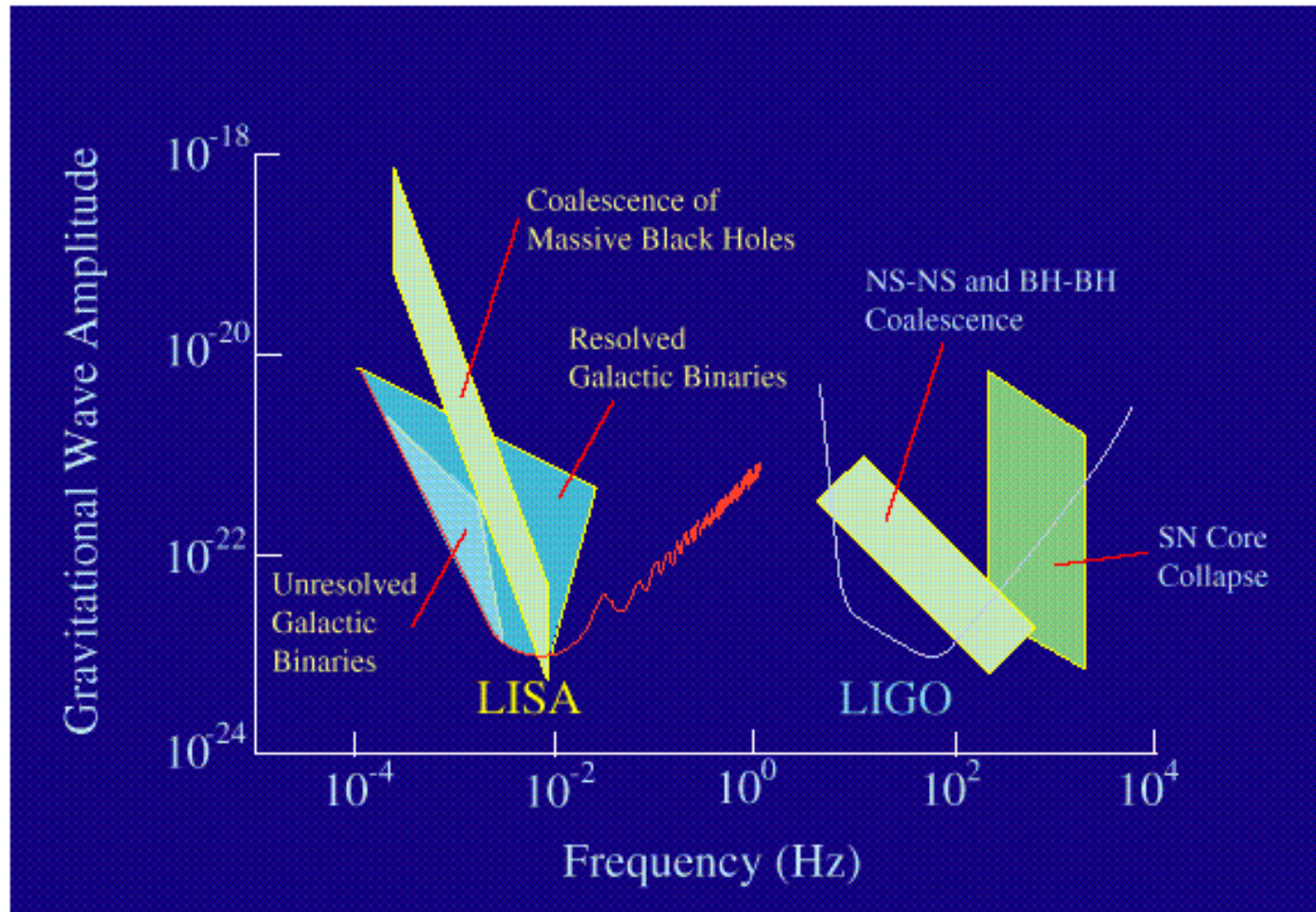
eLISA

3 grudnia 2015 wystrzelono LISA Pathfinder – sondę kosmiczną Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA).

Przetestowanie rozwiązań technicznych potrzebnych do planowanej na 2034 rok misji eLISA (od *Evolved Laser Interferometer Space Antenna*)

Sonda wypuści (25.06.17) dwie unoszące się swobodnie dwukilogramowe masy testowe. Będą się znajdowały w odległości około 38 cm. Następnie zostaną przeprowadzone precyzyjne (z dokładnością do 10 pikometrów) pomiary ich wzajemnego położenia, by wykryć oddziaływanie fal grawitacyjnych. W trakcie tej misji zostaną przetestowane technologie umożliwiające takie pomiary

The Gravitational-Wave Spectrum



March 1, 1999

LISA

Szanse detekcji fal grawitacyjnych

Potencjalne źródła fal grawitacyjnych

- **wybuchy supernowych**
- **układy podwójne gwiazd, których składnikami są obiekty zwarte (gwiazdy neutronowe oraz czarne dziury)**
- **niestabilności we wnętrzach rotujących gwiazd neutronowych**
- **supermasywne czarne dziury znajdujące się w centrach aktywnych galaktyk**
- **stochastyczne zaburzenia w czasoprzestrzeni Wszechświata**

Szanse detekcji fal grawitacyjnych

Układy podwójne obiektów zwartych są prawdopodobnie najlepszymi potencjalnymi kandydatami w poszukiwaniach źródeł fal grawitacyjnych.

Układy podwójne obiektów zwartych (UPOZ):

- podwójne gwiazdy neutronowe (NS-NS)
- układy czarna dziura - gwiazda neutronowa (BH-NS)
- podwójne czarne dziury (BH-BH)

Masywne gęste ciała, okrążające się wzajemnie na ciasnych orbitach, emitują fale grawitacyjne i tracą swoją energię orbitalną.

Okres obiegu nieustannie się zmniejsza.

Szanse detekcji fal grawitacyjnych

Systematyczne zacieśnianie się orbity powoduje, że obiekty zwarte obiegają się coraz szybciej, a sygnał grawitacyjny staje się coraz silniejszy i o coraz wyższej częstotliwości. Ostatecznie dochodzi do katastroficznego złączenia się (koalescencji) dwóch obiektów zwartych, które prowadzi do powstania pojedynczej czarnej dziury.

Istnieje szansa, że ostatnie kilkadziesiąt sekund z życia UPOZ zostanie zaobserwowane przez ziemskie obserwatoria fal grawitacyjnych.

ilu układów obiektów zwartych możemy oczekiwać w zasięgu teleskopu grawitacyjnego?

Szanse detekcji fal grawitacyjnych

Teoria opisująca formację i ewolucję układów podwójnych gwiazd.

Jeśli znamy początkową liczbę gwiazd w naszej Galaktyce oraz tempo formacji gwiazd (a w szczególności układów podwójnych) w historii Galaktyki.











Ile układów zawierających gwiazdy neutronowe oraz czarne dziury powinno znajdować się w Galaktyce.

Synteza populacji oparta na zasadzie Monte Carlo

http://urania.pta.edu.pl/upa6_2002a.html







Ewolucja prowadząca do powstania układu NS-NS

	M1[M _⊙]	GWIAZDA 1	GWIAZDA 2	M2[M _⊙]	a[R _⊙]	e
(I)	12,9			9,56	181	0,4
(II)	12,6			9,52	153	0,0
		↓	↓			
		MT 1				
(III)	2,98			14,3	98,2	0,0
		↓				
		SN Ib				
(IV)	1,24	-		14,3	168	0,4
			↓			
(V)	1,24	-		14,1	140	0,0
			↓			
			MT 2			

Mass Transfer

Część masy traconej przez olbrzyma zostaje zaakreowana przez towarzysza, natomiast pozostała część ucieka z układu.

(VIII)	1,98			1,83	0,27	0,0
			↓			
			SN Ic			
(IX)	1,98			1,26	0,70	0,6

NS-NS

Ewolucja gwiazd rozpoczyna się na Ciągu Głównym. Obie gwiazdy są masywne i znajdują się na szerokiej i silnie ekscentrycznej orbicie (faza I)

Masywniejszy składnik układu ewoluuje szybciej, jako pierwszy trafia na gałąź olbrzymów, zwiększając znacząco swoje rozmiary (faza II)

Olbrzym traci całą swoją otoczkę i pozostaje z niego małomasywna gwiazda helowa (faza III)

Gwiazda helowa ewoluuje bardzo szybko i wkrótce eksplodując w wybuchu supernowej, tworzy pierwszą gwiazdę neutronową w układzie.

Niesymetryczny wybuch oraz związana z nim utrata masy powoduje rozciągnięcie orbity, która staje się na powrót ekscentryczna (faza IV).

Ewolucja prowadząca do powstania układu NS-NS

	M1[M _⊙]	GWIAZDA 1	GWIAZDA 2	M2[M _⊙]	a[R _⊙]	e
(I)	12,9			9,56	181	0,4
(II)	12,6			9,52	153	0,0
		↓ MT 1	↓			
(III)	2,98			14,3	98,2	0,0
		↓ SN Ib				
(IV)	1,24	-		14,3	168	0,4
(V)	1,24	-		14,1	140	0,0
		↓ MT 2	↓			
(VI)	1,82	-		3,51	1,70	0,0
(VII)	1,82	-		3,14	1,83	0,0
		↓ MT 3	↓			
(VIII)	1,98	-		1,83	0,27	0,0
			↓ SN Ic			
(IX)	1,98	-		1,26	0,70	0,6
			↓			
			NS-NS			

Druga gwiazda kończy swoją ewolucję na ciągu głównym i trafia na gałąź olbrzymów. Ekspansja powoduje cyrkularyzację orbity, a następnie drugi epizod transferu masy (faza V)

Tym razem, w odróżnieniu od pierwszego epizodu, masy obu składników są bardzo różne, co powoduje dynamicznie niestabilny transfer masy oraz drastyczne zacieśnienie orbity (faza VI).

Wybuch supernowej (faza VII) i powstanie gwiazdy neutronowej (faza VIII)

Po 23 mln lat ewolucji powstaje bardzo ciasny i ekscentryczny układ składający się z dwóch gwiazd neutronowych (faza IX).

Układ ten przez około 700 tys. lat będzie stopniowo zacieśniał swoją orbitę, aż ostatecznie ulegnie koalescencji.

Szanse detekcji fal grawitacyjnych

**Tabela 1. Przewidywana liczba detekcji dla LIGO I (rok⁻¹)
Rozpoczęta detekcja w 2002 r.**

Rodzaj układu	Zasięg instrumentu	Model standardowy	Zakres (wszystkie modele)
NS-NS	20 Mpc	1×10^{-2}	$2 \times 10^{-4} — 7 \times 10^{-1}$
NS-BH	40 Mpc	2×10^{-2}	$2 \times 10^{-3} — 7 \times 10^{-2}$
BH-BH	100 Mpc	8×10^{-1}	0 — 2
Łącznie		8×10^{-1}	$2 \times 10^{-3} — 2$

Na 1 detekcję trzeba czekać kilkadziesiąt lat

Dr Krzysztof Belczyński, Urania, 6-2002

Szanse detekcji fal grawitacyjnych

Tabela 2. Przewidywana liczba detekcji dla LIGO II (rok⁻¹)

Planowana detekcja na 2014 r. Zwiększona czułość instrumentu poprzez unowocześnienie optyki oraz systemu wyciszania drgań sejsmicznych podłoża oraz szumów termicznych instrumentu

Rodzaj układu	Zasięg instrumentu	Model standardowy	Zakres (wszystkie modele)
NS-NS	350 Mpc	6×10^1	$1 - 4 \times 10^2$
NS-BH	700 Mpc	8×10^1	$9 - 4 \times 10^2$
BH-BH	1500 Mpc	2×10^3	$0 - 8 \times 10^3$
Łącznie		3×10^3	$10 - 8 \times 10^3$

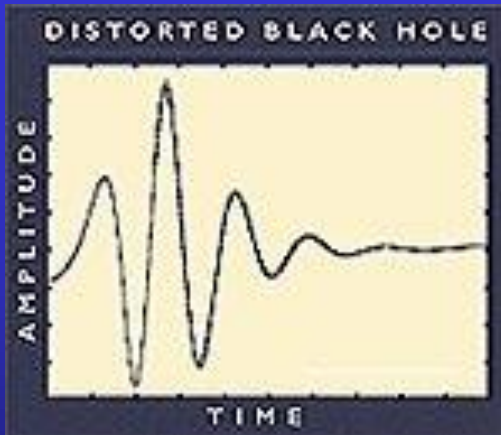
Co najmniej 10 detekcji rocznie

Dr Krzysztof Belczyński, Urania, 6-2002

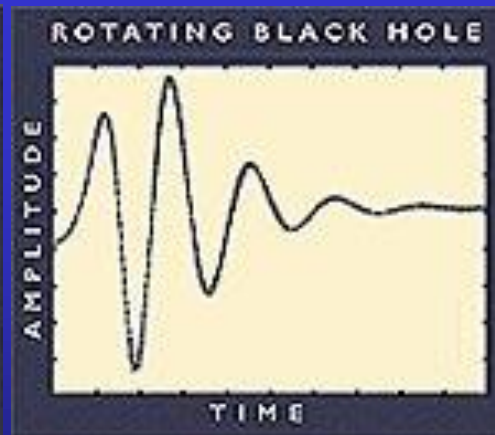
Fale grawitacyjne

Symulacje komputerowe fal grawitacyjnych z różnych źródeł.

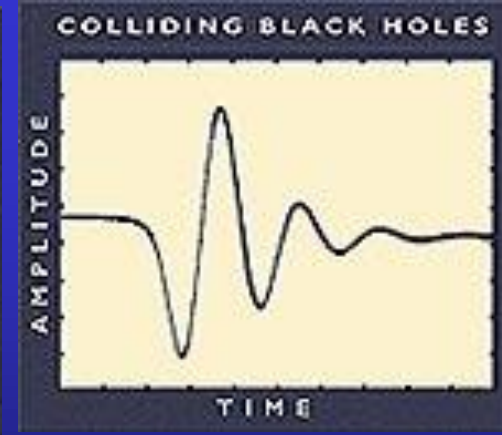
Zaburzona
czarna dziura



Zaburzona, rotująca
czarna dziura

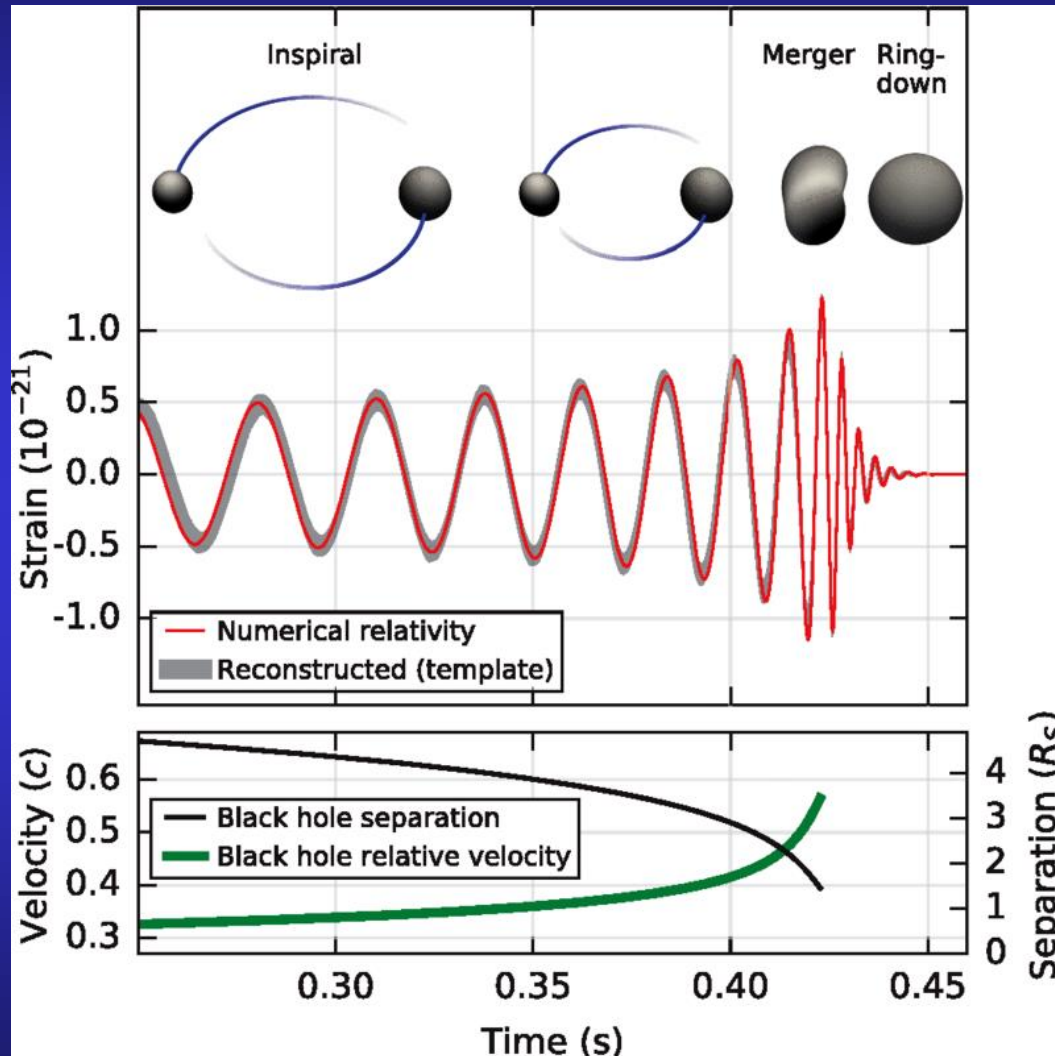


Dwie jednakowe czarne
dziury zderzające się
„czołowo”

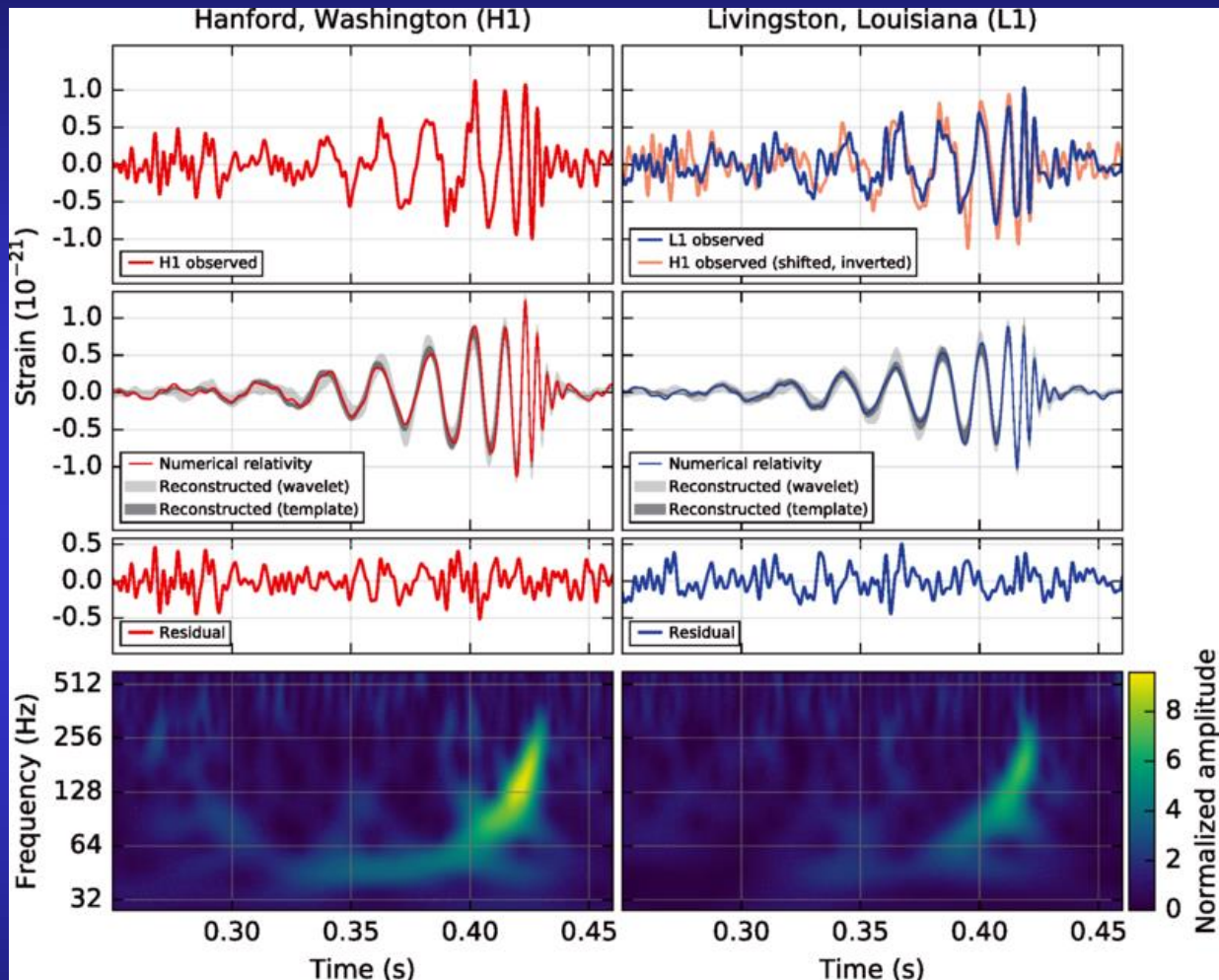


<http://archive.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/LIGO.html>

Fale grawitacyjne



Rejestracja fal grawitacyjnych



Fale zarejestrowane 14 września 2015 przez oba detektory LIGO

Phys. Rev. Lett. 116, 061102 – Published 11 February 2016

Rejestracja fal grawitacyjnych

Fale pochodziły ze zderzenia dwóch czarnych dziur o masach około 29 i 36 mas Słońca.

Do połączenia doszło ok. 1,3 miliarda lat temu, a w jego wyniku masa około 3 mas Słońca została zamieniona na fale grawitacyjne.

Druga detekcja: 26 grudnia 2015 roku - efekt zderzenia dwóch czarnych dziur o masach około 14,2 i 7,5 mas Słońca. Do połączenia doszło ok. 1,4 mld lat temu. W wyniku połączenia powstał obiekt o masie około 20,8 mas Słońca, pozostała część masy (około 1 masa Słońca) została zamieniona na energię fal grawitacyjnych.

Rejestracja fal grawitacyjnych

**Konferencja „Gravitational Wave Physics and Astronomy”
w College Park w Maryland (USA) 1 – 4 grudnia 2018**

Konsorcjum naukowców związanych z LIGO i Virgo wykryło fale grawitacyjne pochodzące z dziesięciu układów podwójnych czarnych dziur i jednego układu podwójnego gwiazd neutronowych.

Pierwsza kampania obserwacyjna (LIGO) 12.09.2015 - 19 .01.2016

- wykryto fale grawitacyjne z trzech zderzeń czarnych dziur w układach podwójnych

Druga kampania obserwacyjna (LIGO i od 1.08 VIRGO) 30.11.2016 – 25.08.2017 roku.

- pierwsza obserwacja zderzenia dwóch gwiazd neutronowych
- siedem kolizji czarnych dziur

Pierwsza jednoczesna detekcja fal grawitacyjnych i elektromagnetycznych

Kolaboracja LIGO – VIRGO zarejestrowała sygnał GW170817 pochodzący od zderzenia 2 gwiazd neutronowych o masach 1.48 i 1.26 mas Słońca w odległości 40 Mpc.

Pozostałość po zderzeniu ma masę 2,74 mas Słońca (czarna dziura czy gwiazda neutronowa?)

Okolo 1,74 s później obserwatoria satelitarne Fermi oraz INTEGRAL zarejestrowały błysk gamma GRB 170817a

3 detektory pozwoliły na precyzyjną lokalizację kolizji (28°) kwadratowych w gwiazdozbiorze Hydry i obserwację fotonów pochodzących z wybuchu i jego późniejszej ewolucji w świetle widzialnym, ultrafiolecie, podczerwieni, w zakresie radiowym i X.