

Fale grawitacyjne

Grawitacja Newtona i Einsteina.

Idea detekcji fal.

Źródła astrofizyczne.

Michał Bejger (CAMK PAN)

Spotkania z astronomią / 06.02.17

Plan

- ★ Grawitacja i inne oddziaływania,
- ★ Fale grawitacyjne,
- ★ Detektory (interferometry),
- ★ Pierwsza bezpośrednia obserwacja fal,
- ★ Astrofizyczne źródła fal.

Cztery obecnie znane oddziaływania podstawowe

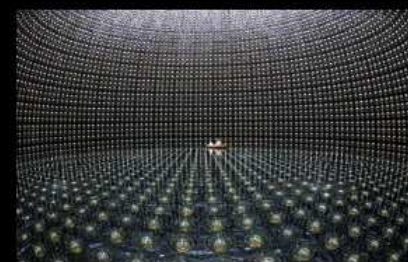
- ★ Elektromagnetyzm
(światło, promienie X,
radio, ciepło...)

★ γ foton



- ★ Oddziaływania słabe
(radioaktywność, rozpady,
neutrino)

★ bozony W^{\pm}
i Z^0



- ★ Oddziaływania silne
(stabilność jąder
atomowych)

★ gluony



- ★ Grawitacja

★ grawiton (?)



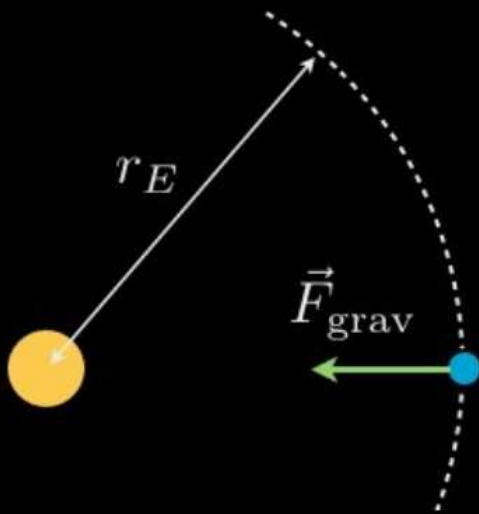
Gravity.

It's not just a good idea.
It's the Law.

Grawitacja Newtona i Einsteina

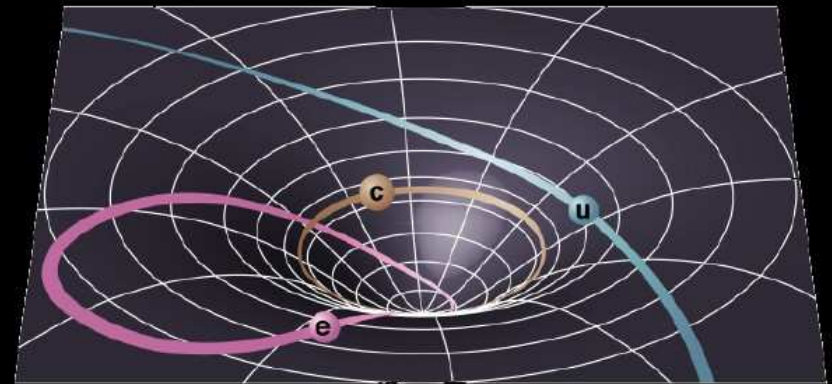
Newton: *Siła* grawitacyjna działająca natychmiastowo na odległość:

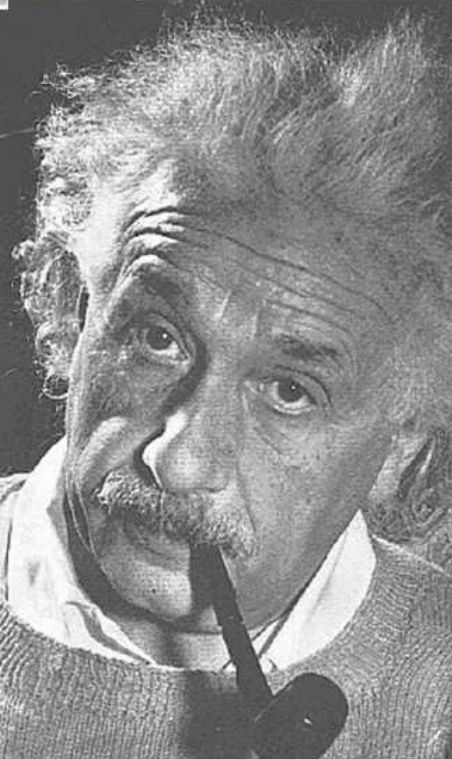
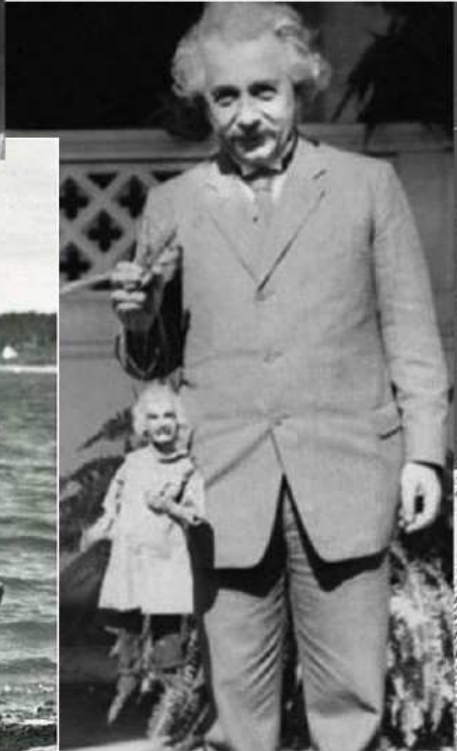
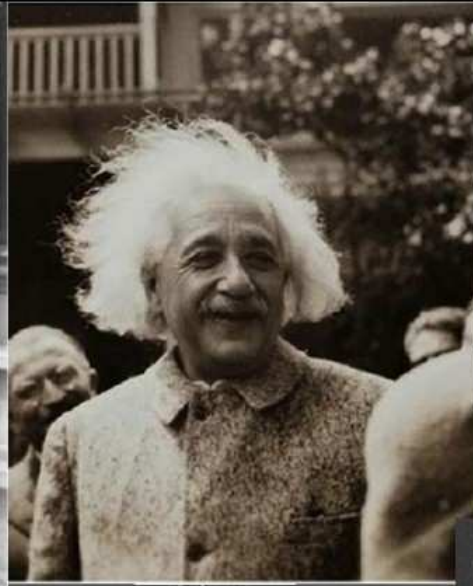
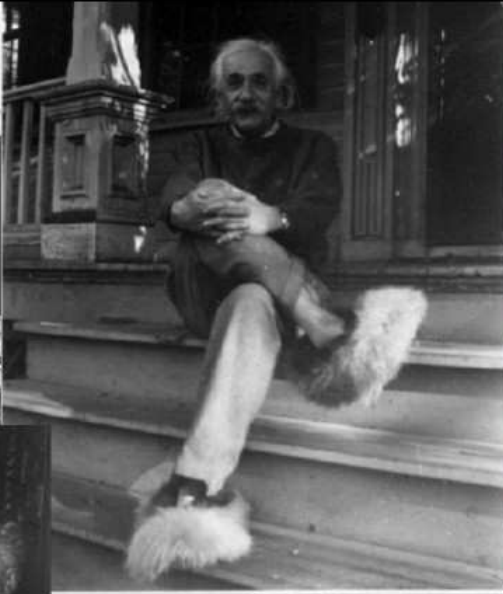
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



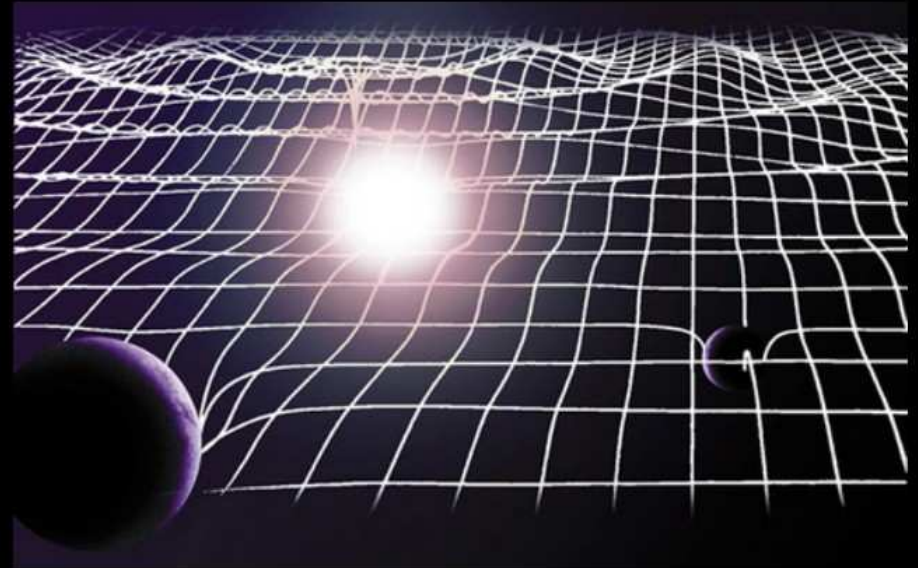
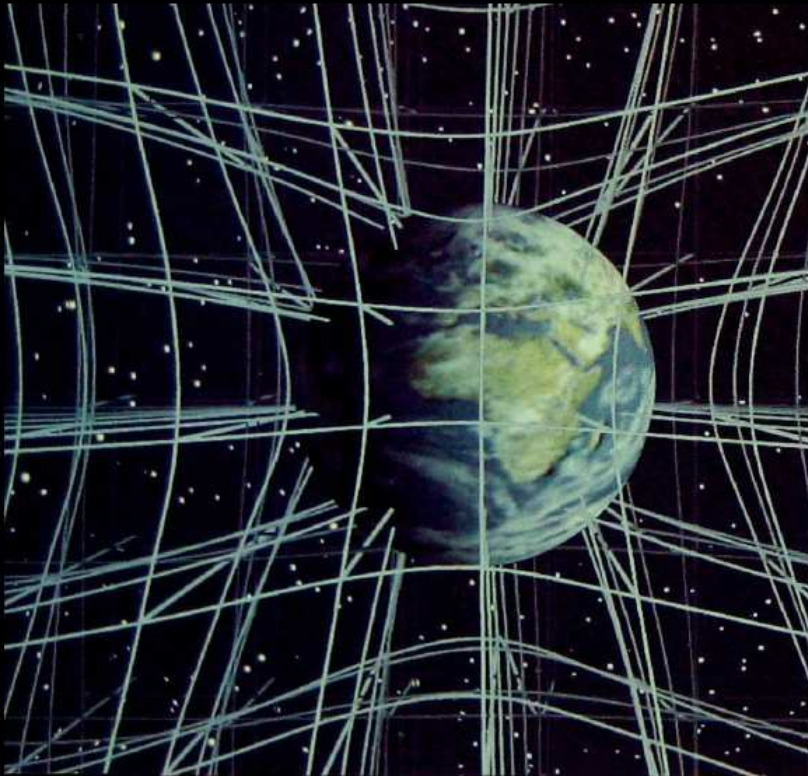
Einstein: Swobodny ruch obiektów wzdłuż „najprostszych” trajektorii w *zakrzywionej* czasoprzestrzeni.

Masy „komunikują się” używając grawitacji rozchodzącej się z prędkością światła.

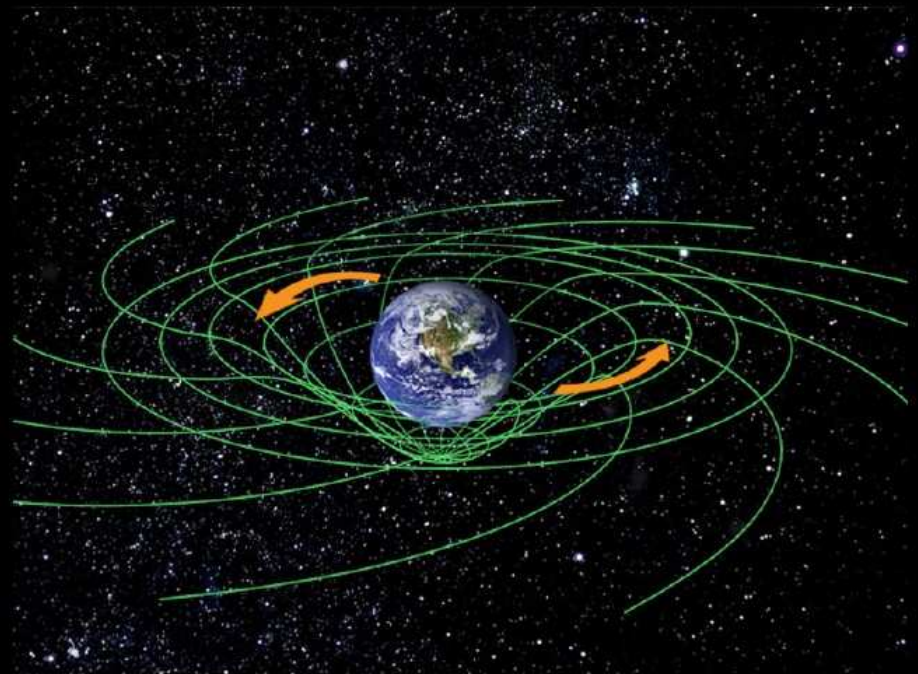




Einstein (1915): grawitacja *jest* geometrią czasoprzestrzeni



"Masy decydują o krzywiznie czasoprzestrzeni, czasoprzestrzeń decyduje o ruchu mas."



Grawitacja Newtona i Einsteina



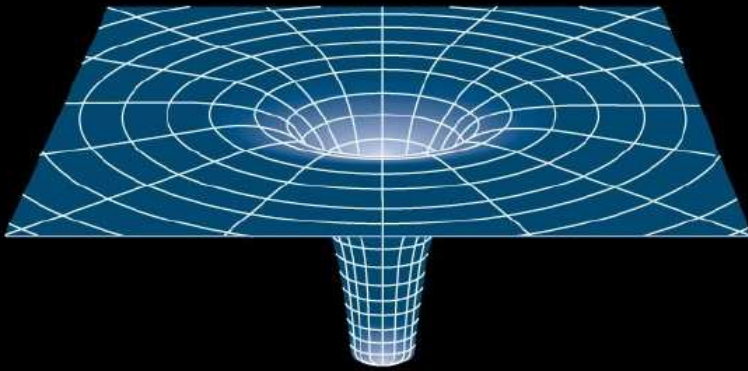
Absolutny czas i przestrzeń,
rozwiązanie dane raz na zawsze.
Niezmienne orbity.



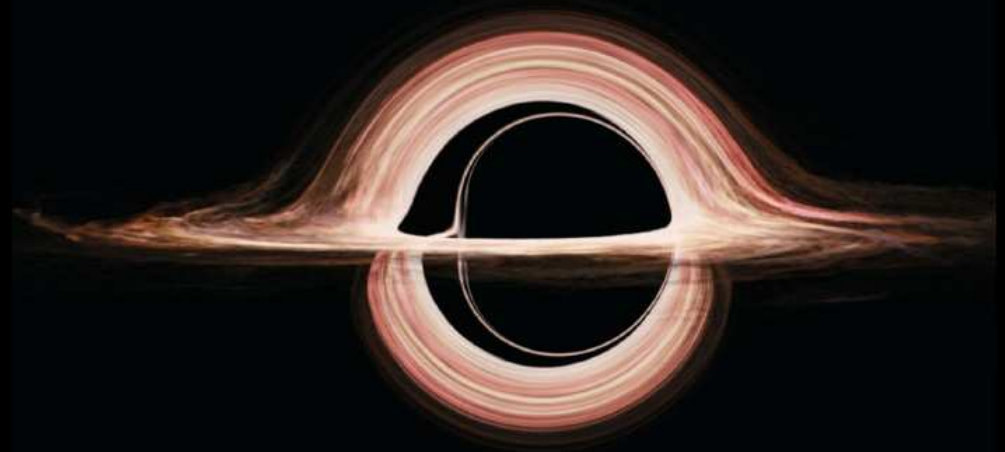
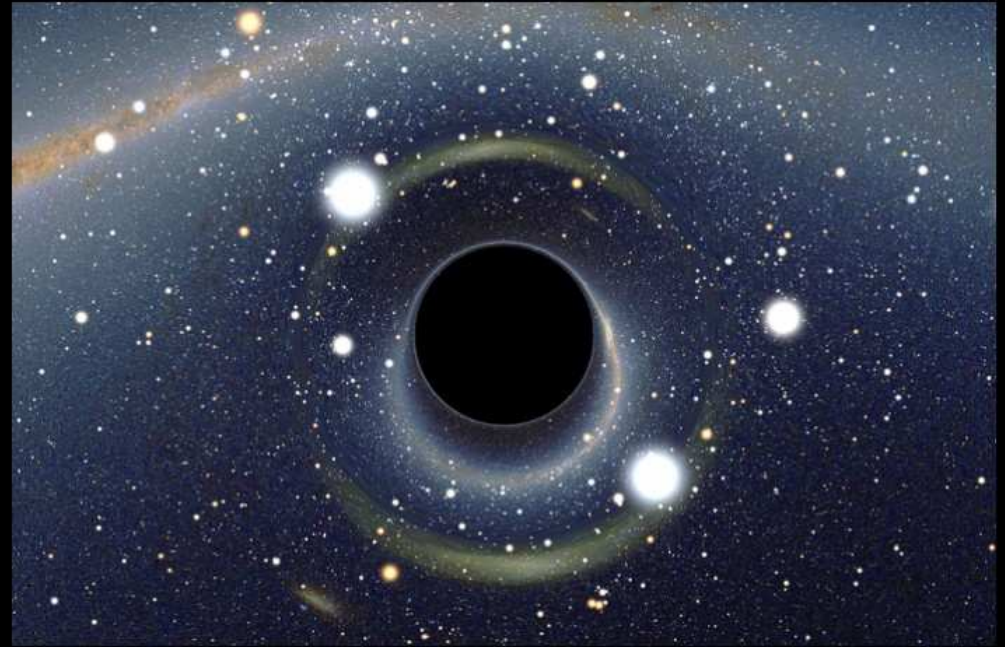
Niezmienny układ dwóch ciał nie istnieje.

Ciągła ewolucja dzięki aktywnej obecności trzeciego „ciała”, czasoprzestrzeni.

Schwarzschild (1916): czarne dziury



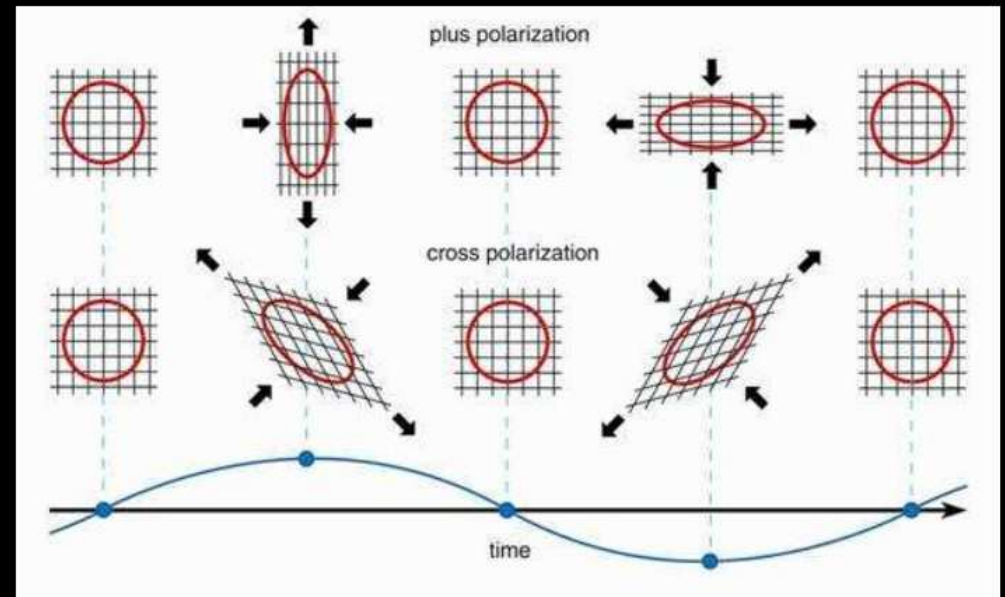
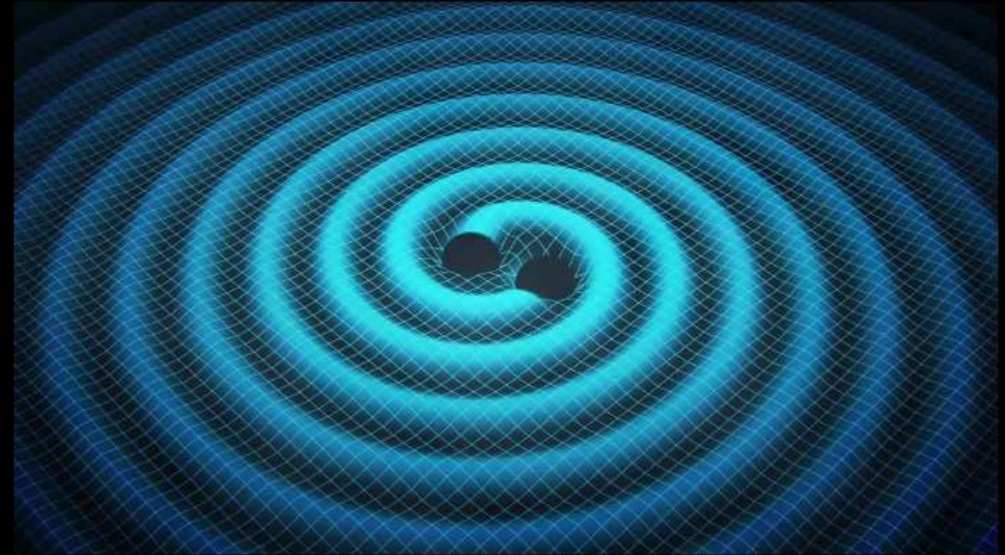
- ★ Region czasoprzestrzeni o tak dużej krzywiznie, że prędkość ucieczki z niej jest większa od prędkości światła.
- ★ Masy: kilka M_{\odot} - kilka miliardów M_{\odot} .
- ★ Czarne dziury mogą wirować (Kerr 1963).



Fale grawitacyjne

Einstein (1916) - istnieją rozwiązania równań ogólnej teorii względności, które zachowują się jak fale (*zmienne w czasie zaburzenia krzywizny propagujące się z prędkością światła*):

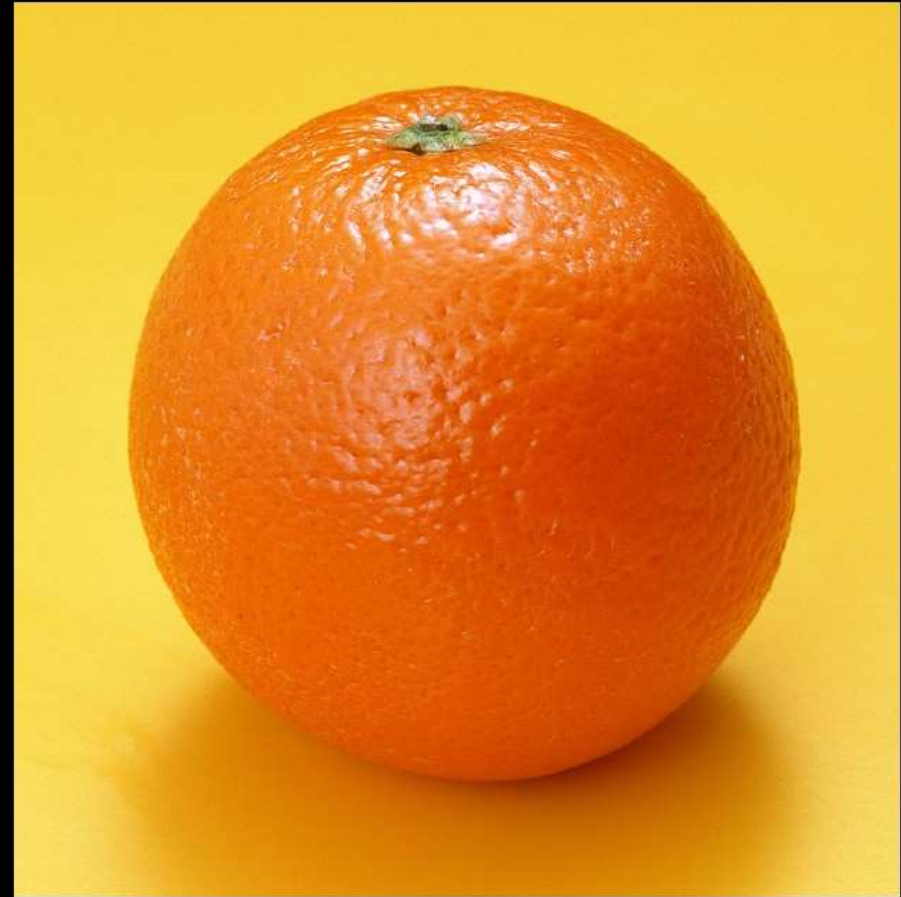
- ★ fale poprzeczne,
- ★ powstają podczas przyspieszonego ruchu ładunków (mas),
- ★ dwie polaryzacje (+ i ×).



Fale grawitacyjne

- ★ Długość fal emitowanych przez obiekty astrofizyczne λ jest o wiele mniejsza niż rozmiar innych krzywizn \mathcal{L} .
- ★ Opis krzywizny przy pomocy tensora Riemanna:

$$R_{\alpha\beta\gamma\delta} = R_{\alpha\beta\gamma\delta}^{GW} + R_{\alpha\beta\gamma\delta}^B$$



B - wielkoskalowe, „prawie-płaskie” tło,
 $\mathcal{L} \simeq 10 \text{ cm}$,

GW - małe zaburzenia, $\lambda \simeq \text{mm}$.

Fale grawitacyjne: postęp w teorii, dowody pośrednie

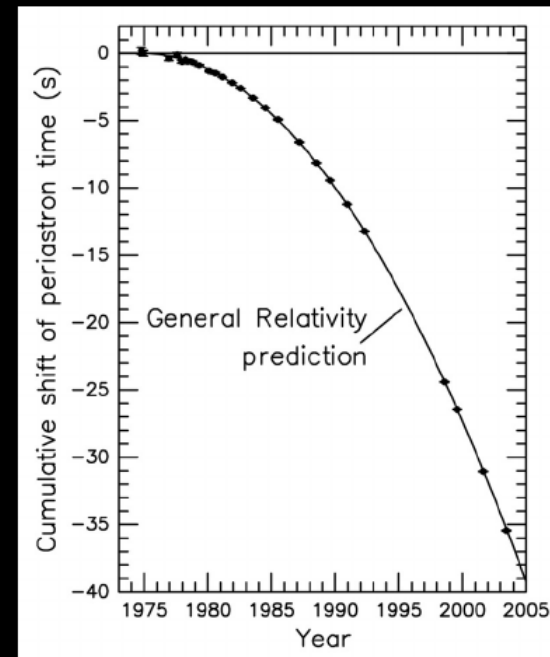
Lata 50te - przełom teoretyczny w zrozumieniu natury fal:

- ★ Herman Bondi, Felix Pirani, **Andrzej Trautman** (fale grawitacyjne przenoszą energię!)

Lata 60te - niezwykła intuicja **Bohdana Paczyńskiego**:

- ★ Ewolucja orbit układów podwójnych WZ Sge i HZ29 **zdominowana** przez emisję fal grawitacyjnych.

Lata 70te - obserwacje pulsarów w układach podwójnych (układ Hulse'a-Taylora):

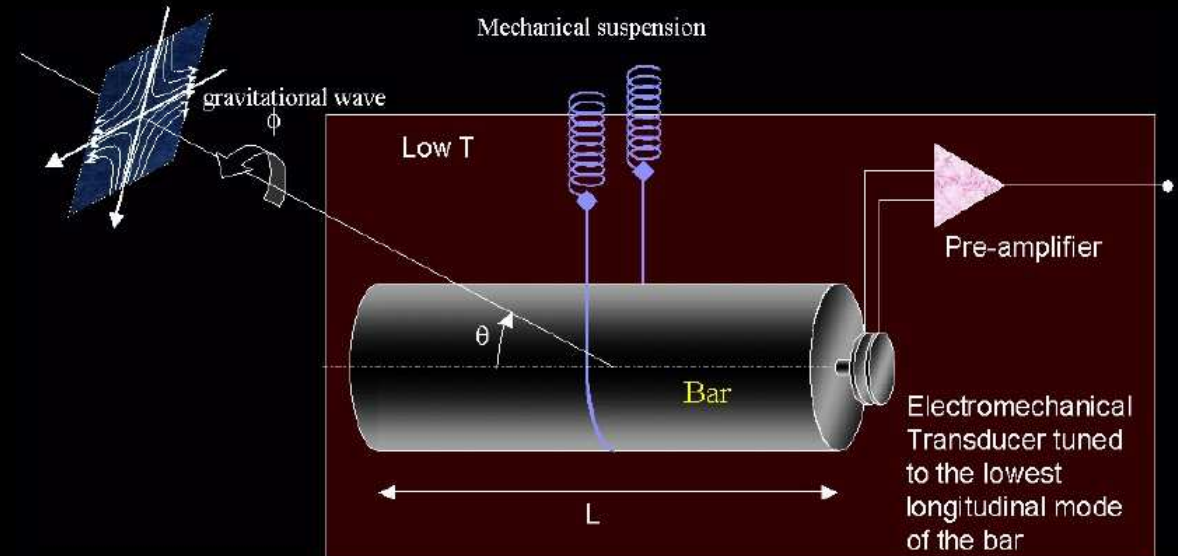


Układ traci energię zgodnie z przewidywaniem teorii względności opisującym emisję fal grawitacyjnych.

Idea detekcji: walce rezonansowe

Pomysł podjęty przez Josepha Webera w latach 60tych:

- ★ Fale grawitacyjne przenoszą energię → wzbudzają vibracje w detektorze
- ★ Wąskopasmowy detektor (czułość w okolicy charakterystycznej częstości walca)



Idea detekcji: pomiar odległości w czasoprzestrzeni

Fale grawitacyjne to niewielkie zaburzenia metryki

czasoprzestrzeni: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$.



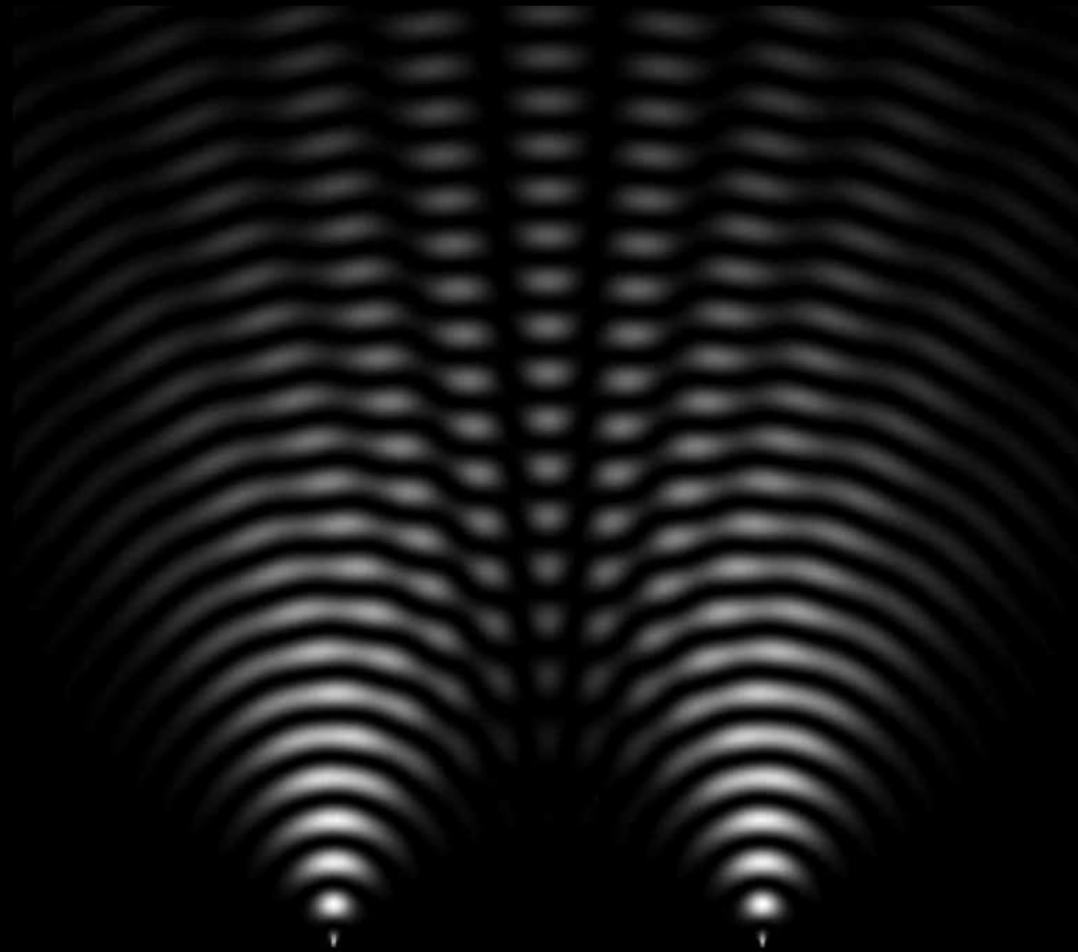
(Quentin Blake „Izaak Newton”)



(Rene Magritte „Syn Człowieczy”)

Fale grawitacyjne zmieniają czasoprzestrzenną odległość pomiędzy swobodnie poruszającymi się obiektami.

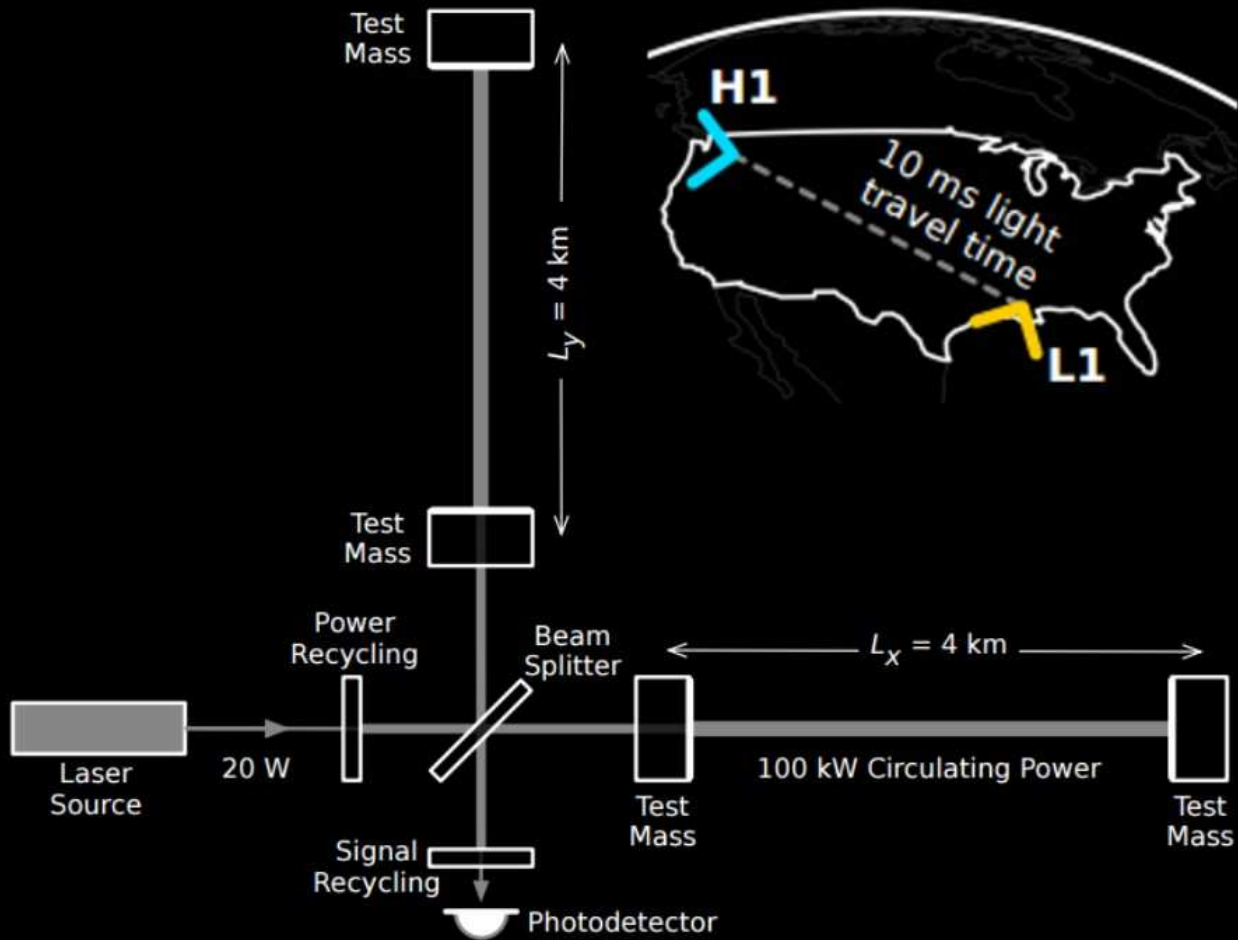
Idea detekcji: światło jako linijka. Interferencja



„Linijka świetlna”: Prędkość światła jest stała w każdym układzie odniesienia.

Pomiar odległości = pomiar czasu przelotu światła.

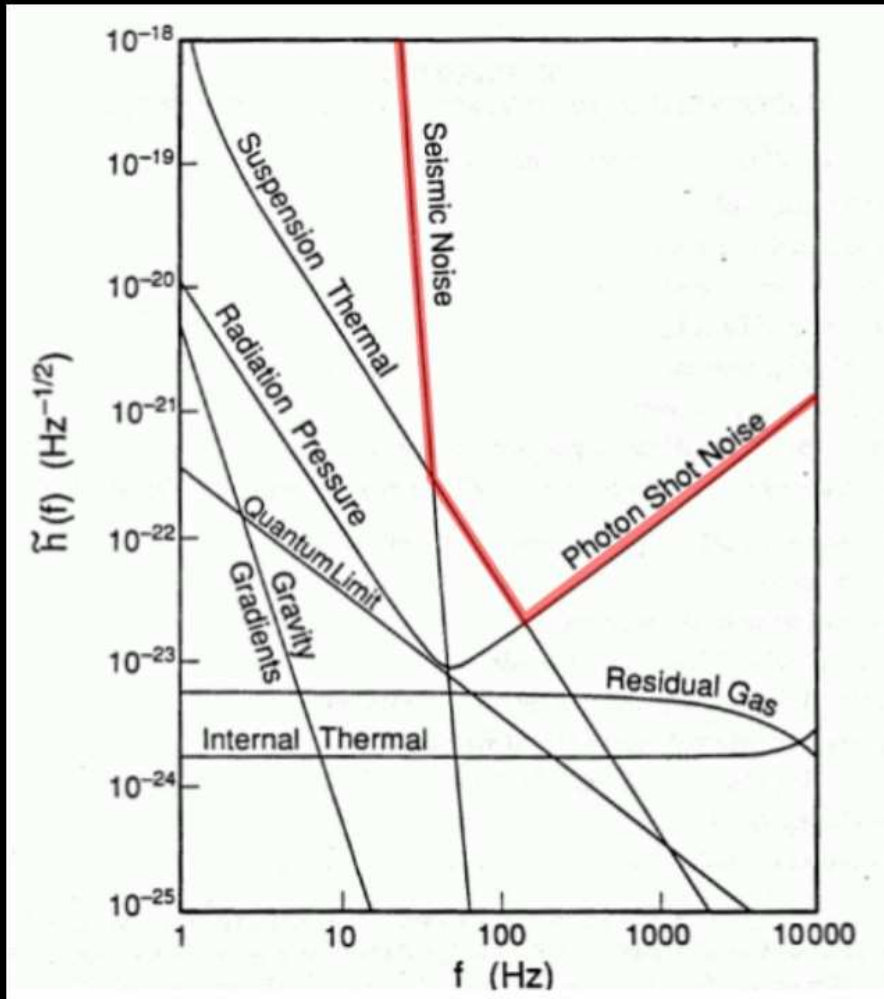
Idea detekcji: interferometria laserowa



Różnice długości ramion są **bardzo** małe. Amplituda fali

- ★ jest 1000 razy mniejsza niż rozmiar protonu (10^{-15} m),
- zmierzenie odległości Ziemia-Słońce z dokładnością do rozmiaru atomu (10^{-10} m).

Jak wygląda krzywa czułości interferometru?



Initial LIGO (1989)

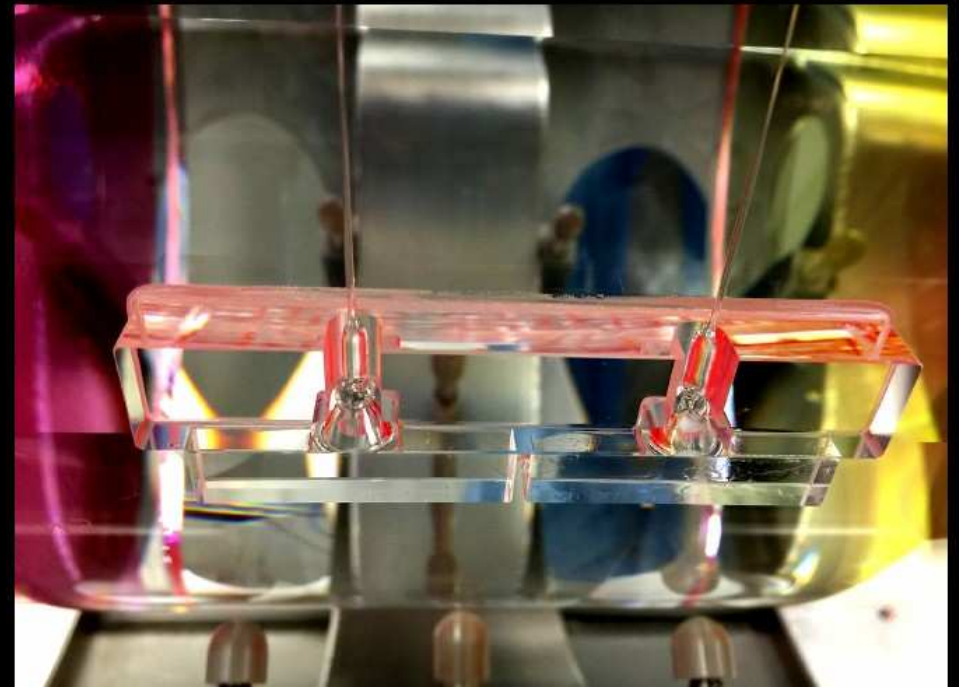
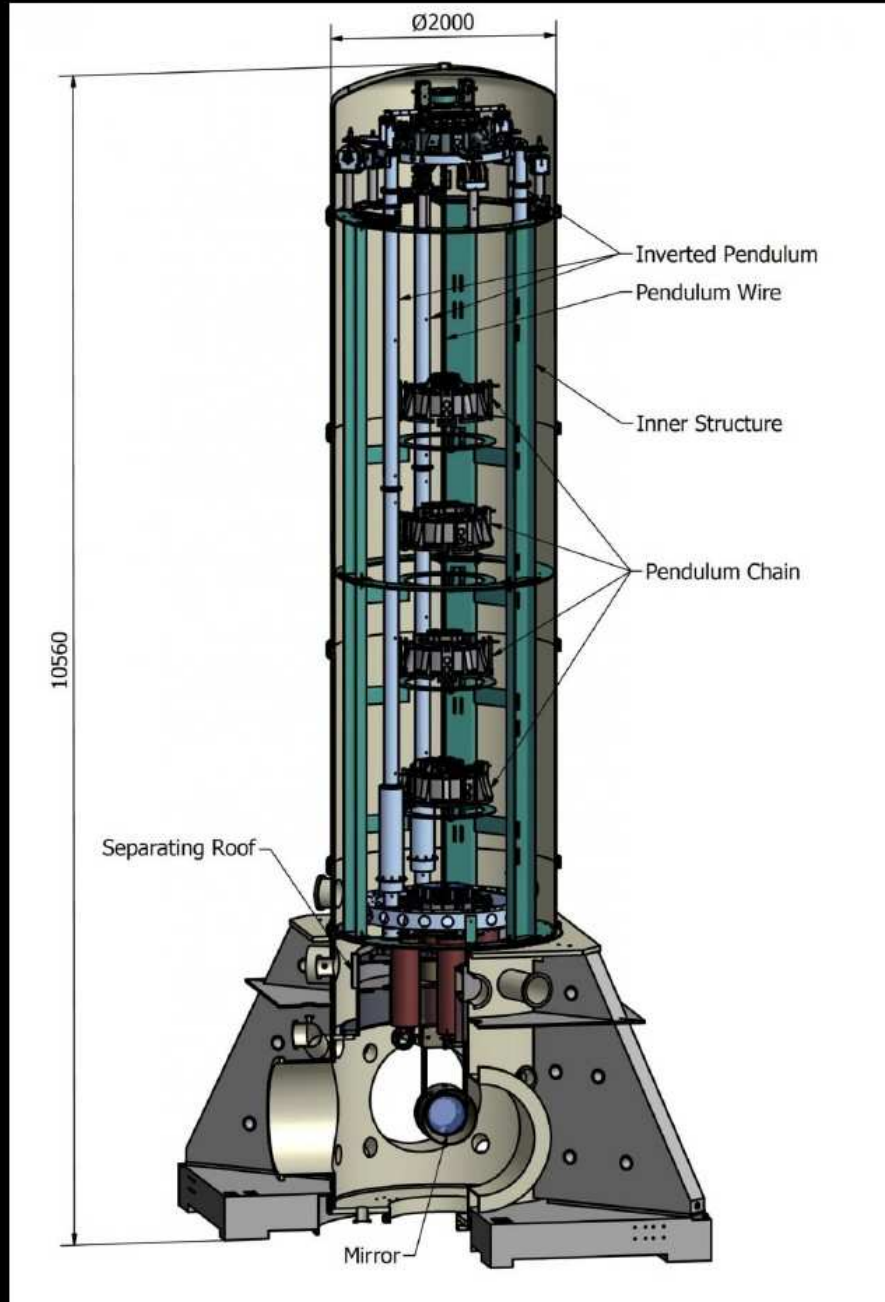
- ★ Zakres częstotliwości podobny do ludzkiego ucha:



Od około 20 Hz (H0) do paru tysięcy Hz (3960 Hz, H7) - 8 oktaw.

- ★ Podobnie jak w przypadku ucha słaba rozdzielczość kątowna.

Lustra - „swobodnie spadające” masy testowe



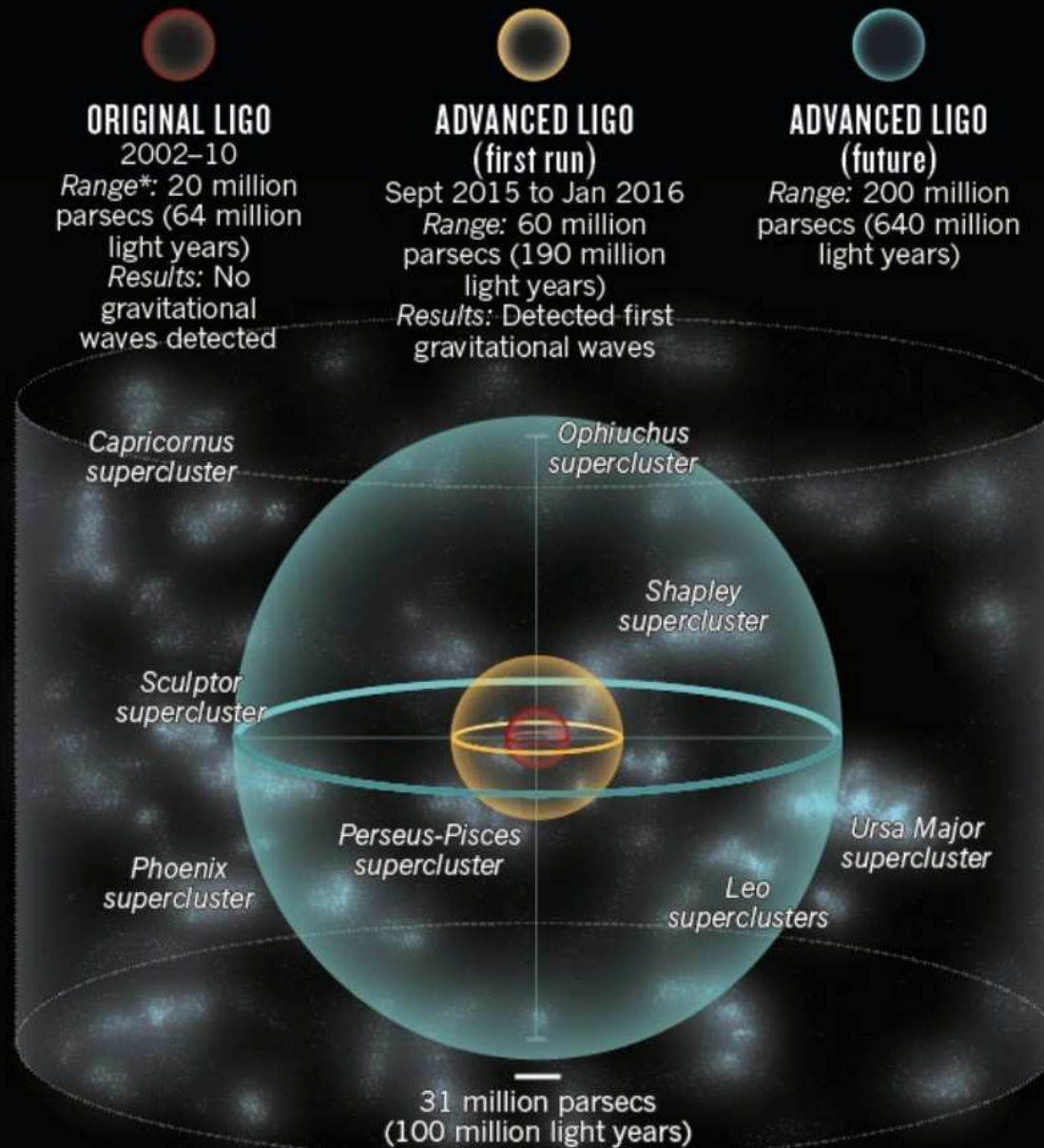
Sieć detektorów LIGO-Virgo



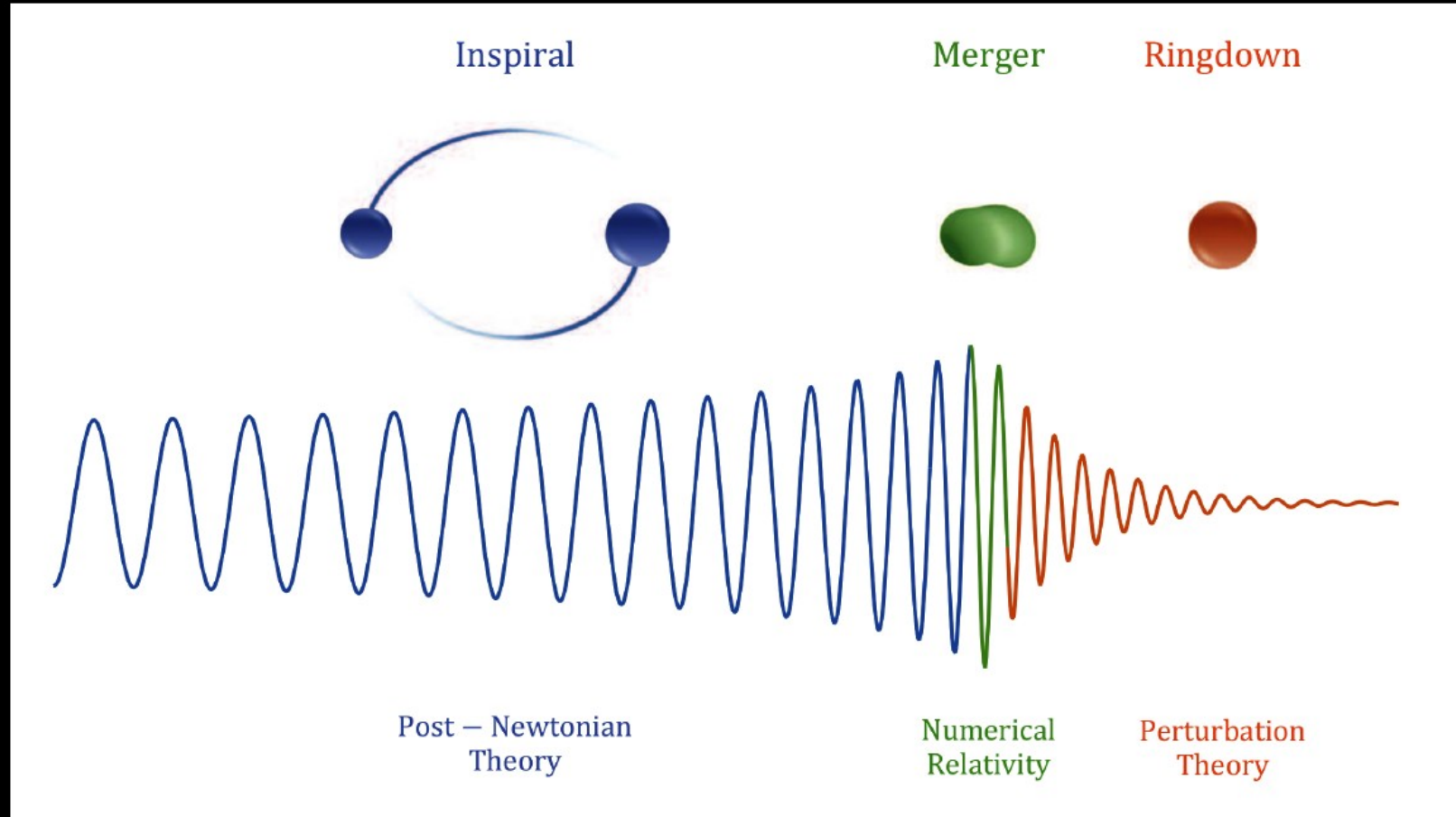
Koniec „Wieków Ciemnych”: kampania O1 i O2

Obserwacje dwóch detektorów LIGO O1: (wrzesień 2015 - styczeń 2016).

Początek sezonu obserwacyjnego O2: 30 listopada 2016.

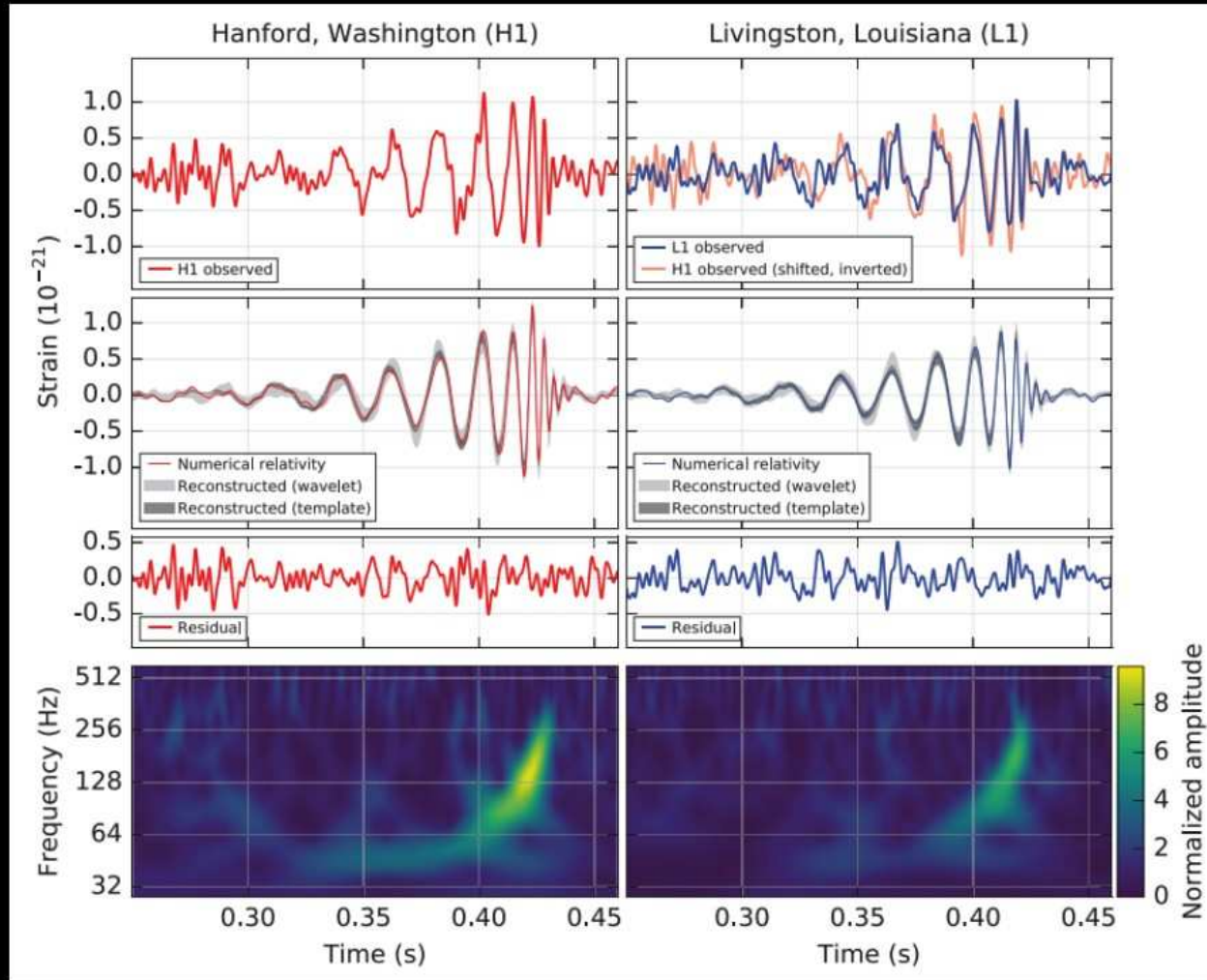


Ewolucja układu podwójnego



GW150914: układ podwójny czarnych dziur

14 września 2015 r. oba detektory LIGO (Livingston, a 7 ms później Hanford) zarejestrowały ten sam sygnał:



Parametry źródła sygnału i odległość uzyskano metodami statystycznymi (*filtr dopasowany*). Poziom istotności sygnału: $> 5.1\sigma$

GW150914: parametry

- ★ $M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$, $M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$,

- ★ Parametry końcowej czarnej dziury:

- ★ masa $M = 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$,

- ★ spin $a = 0.67_{-0.07}^{+0.05}$,

- ★ Odległość: 410_{-180}^{+160} Mpc

czyli 1 miliard 300 milionów lat świetlnych,

przesunięcie ku czerwieni $Z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$.

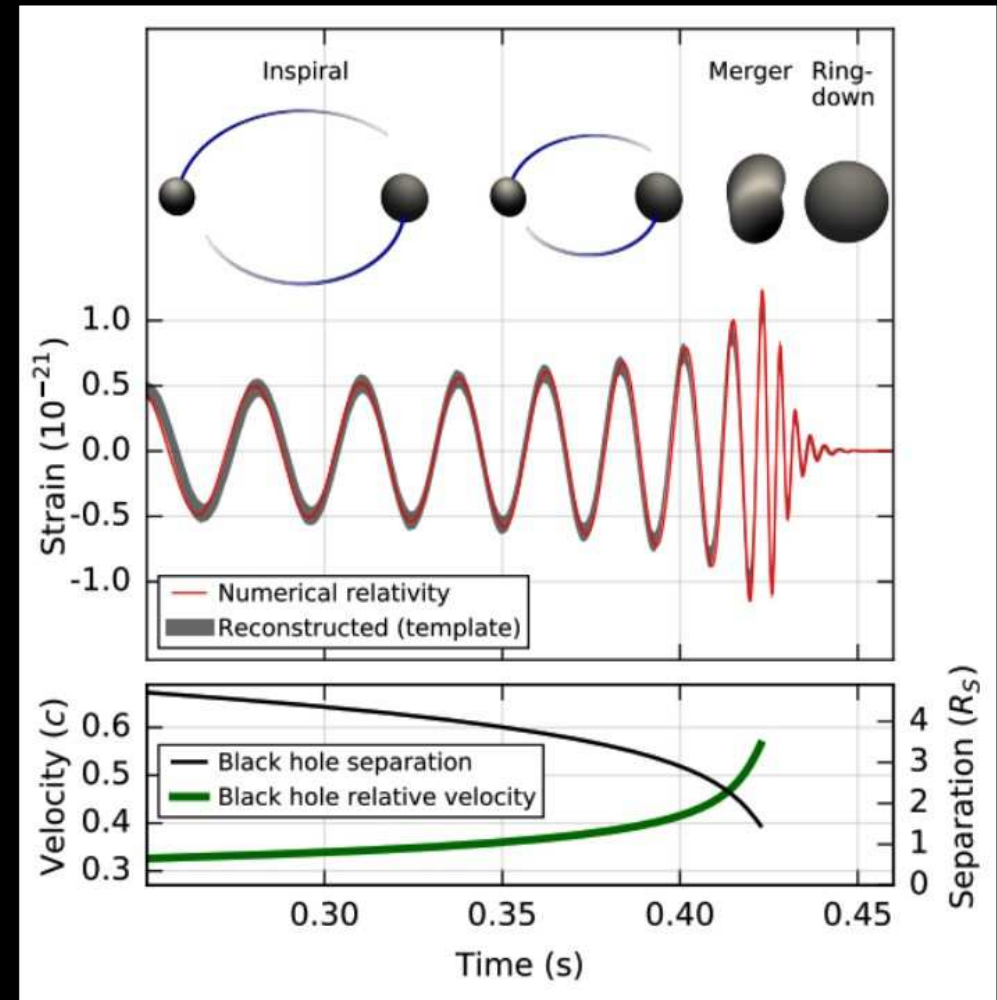
Prawdopodobieństwo fałszywego alarmu: <1 na 5 milionów

Częstość wystąpienia fałszywego alarmu: <1 na 200 tysięcy lat.

GW150914: parametry

- ★ Czas trwania: **0.12 s**,
- ★ Końcowa prędkość orbitalna: **0.5 c**,
- ★ Energia wyemitowana w falach:
 $E = mc^2 = 3_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$,
- ★ W momencie największej „jasności”: **$3.6 \times 10^{49} \text{ W}$**
(**$200 M_{\odot} c^2 / \text{s}$**),

→ kilkadziesiąt razy więcej mocy niż wszystkie gwiazdy we Wszechświecie w falach elektromagnetycznych!



Skąd wiadomo, że był to układ podwójny czarnych dziur?

Amplituda fali emitowanej przez układ podwójny

$$h \propto \mathcal{M}^{5/3} \times f^{2/3} \times r^{-1}$$

gdzie \mathcal{M} jest **masą ćwierku**, daną wprost z obserwacji „spirowania” układu:

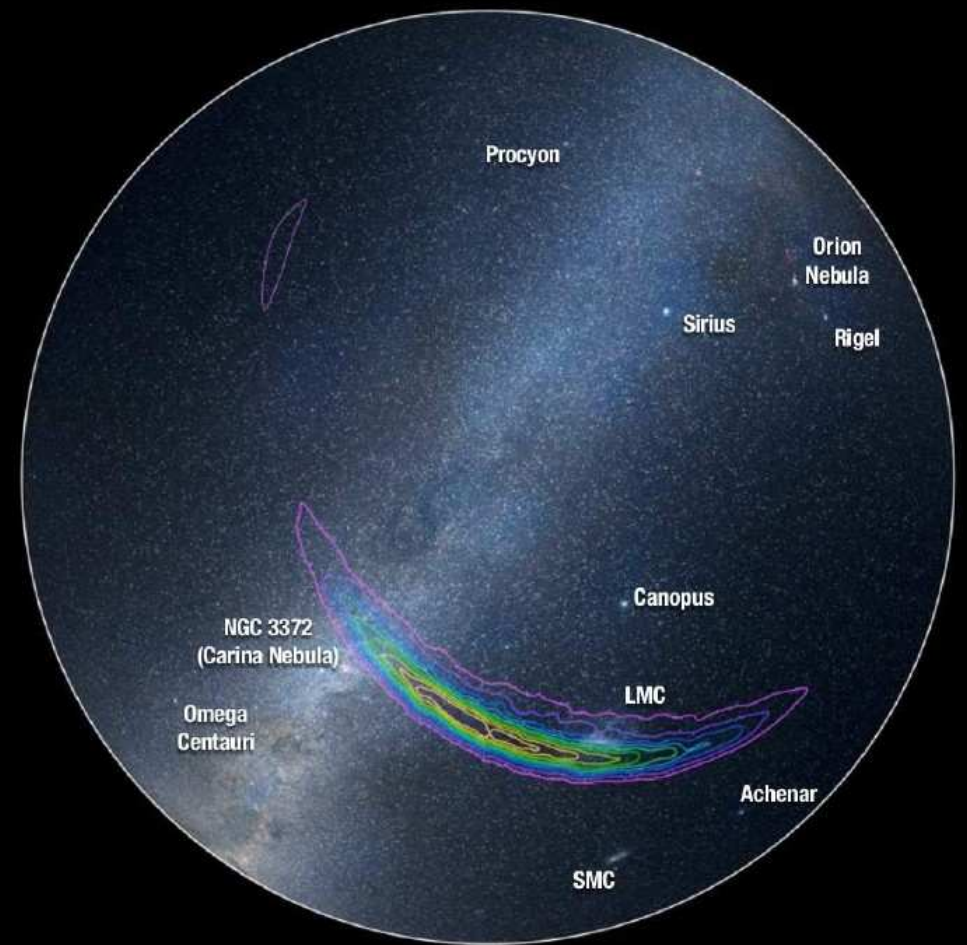
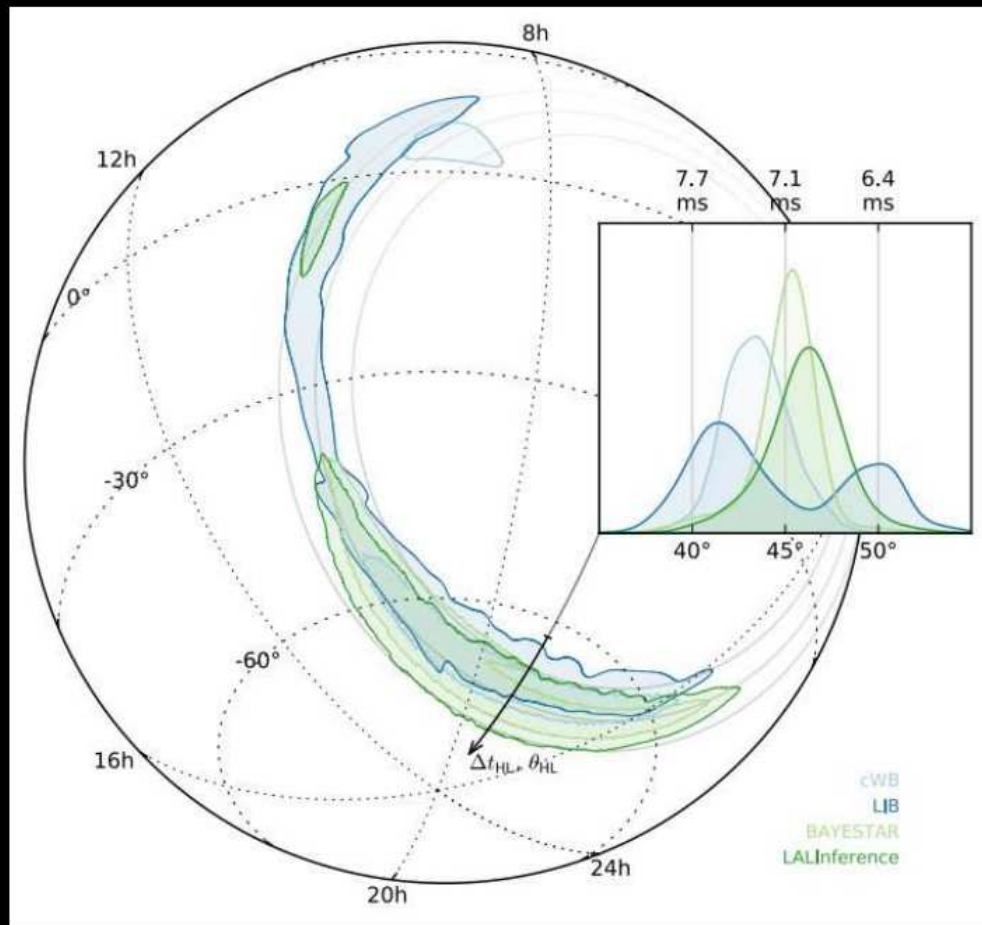
$$\mathcal{M} \equiv \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}} = \frac{c}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Z poprawek wyższego rzędu, modelu „zlewania się”: stosunek mas M_2/M_1 , tempa rotacji (spiny)...

Zarejestrowano 8 orbit do częstości 150 Hz (częstość orbitalna 75 Hz).

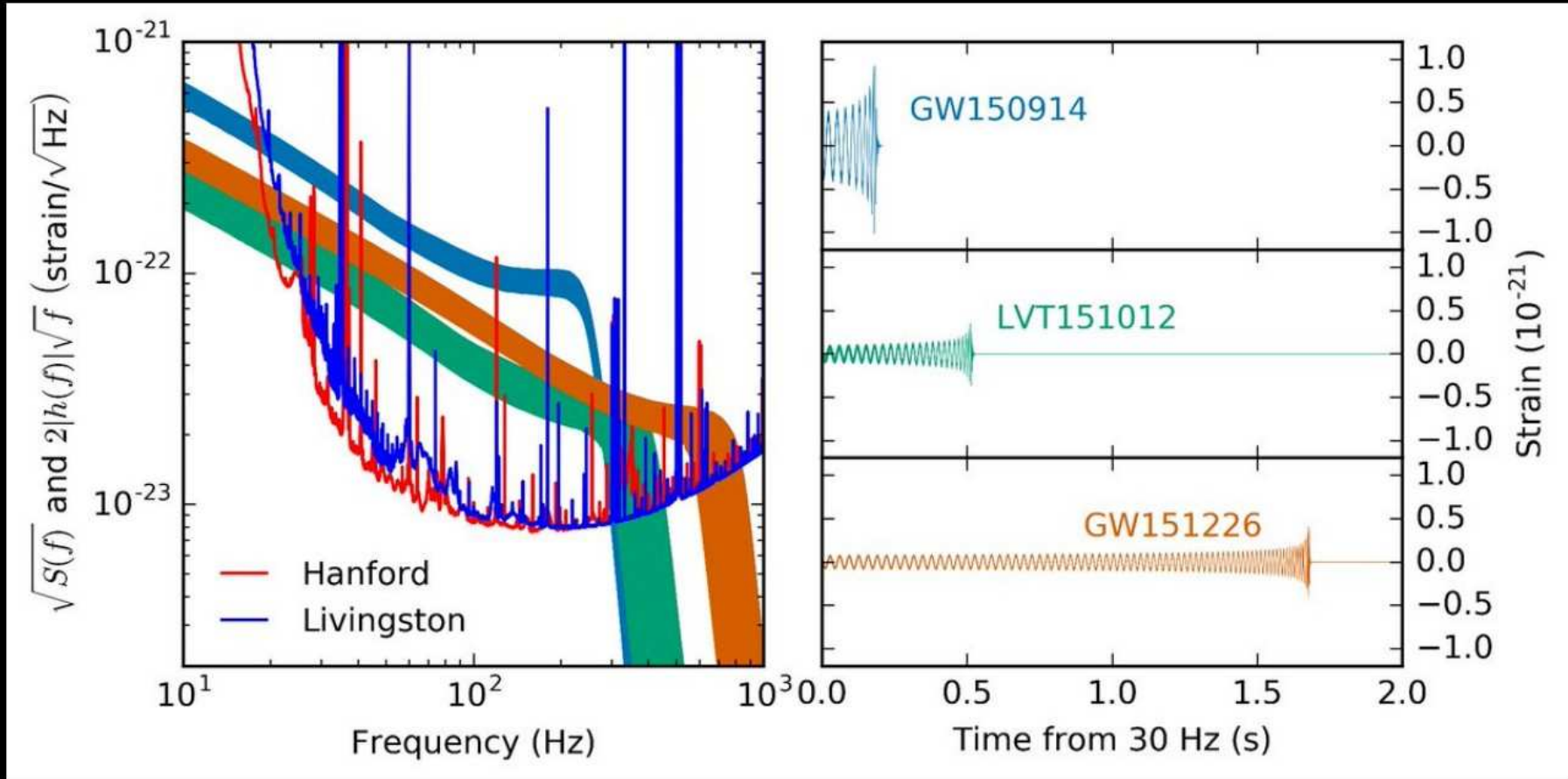
- ★ **Dwie gwiazdy neutronowe**: układ dostatecznie zwarty, ale za lekki,
- ★ **Gwiazda neutronowa-czarna dziura**: układ dostatecznie masywny, ale czarna dziura zbyt duża, połączenie nastąpiłoby przy niższej częstości.

Położenie źródła na niebie



600 stopni kwadratowych z wiarygodnością 90% (trzeci detektor - **Virgo** - niezbędny do triangulacji!)

LIGO O1: 2 („i pół”) detekcji

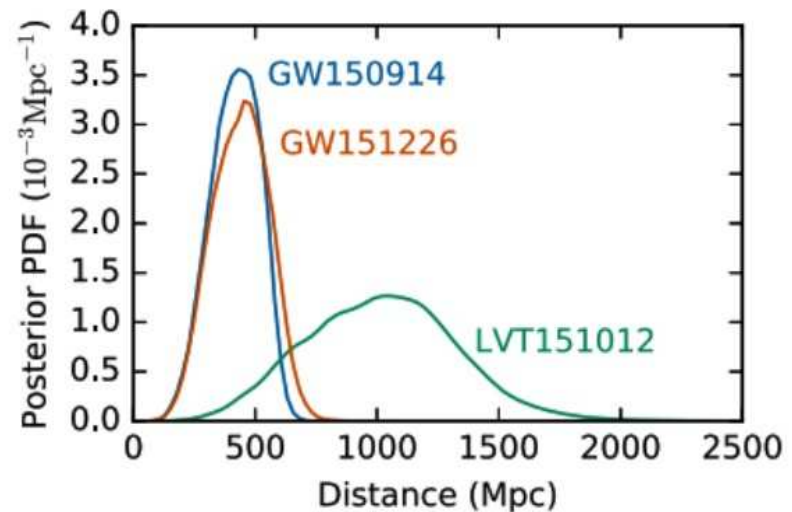
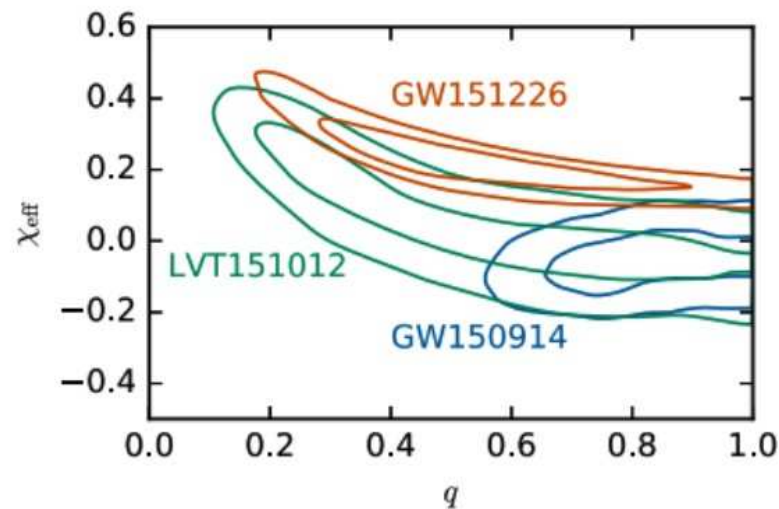
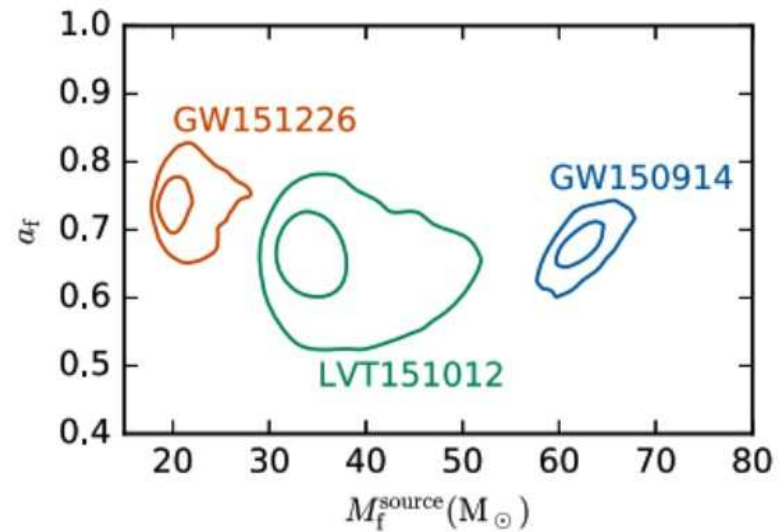
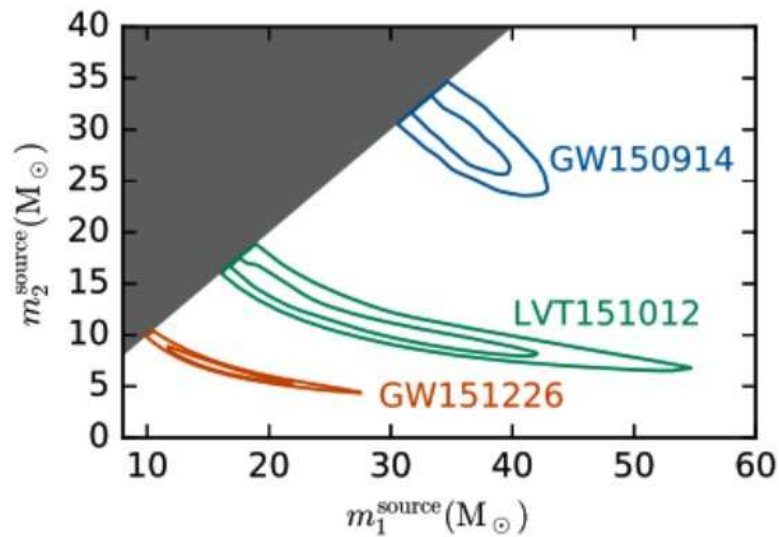


Stosunek sygnał-szum ρ :

$$\rho^2 = \int_0^\infty \left(\frac{2|\tilde{h}(f)|\sqrt{f}}{\sqrt{S_n(f)}} \right)^2 d\ln(f)$$

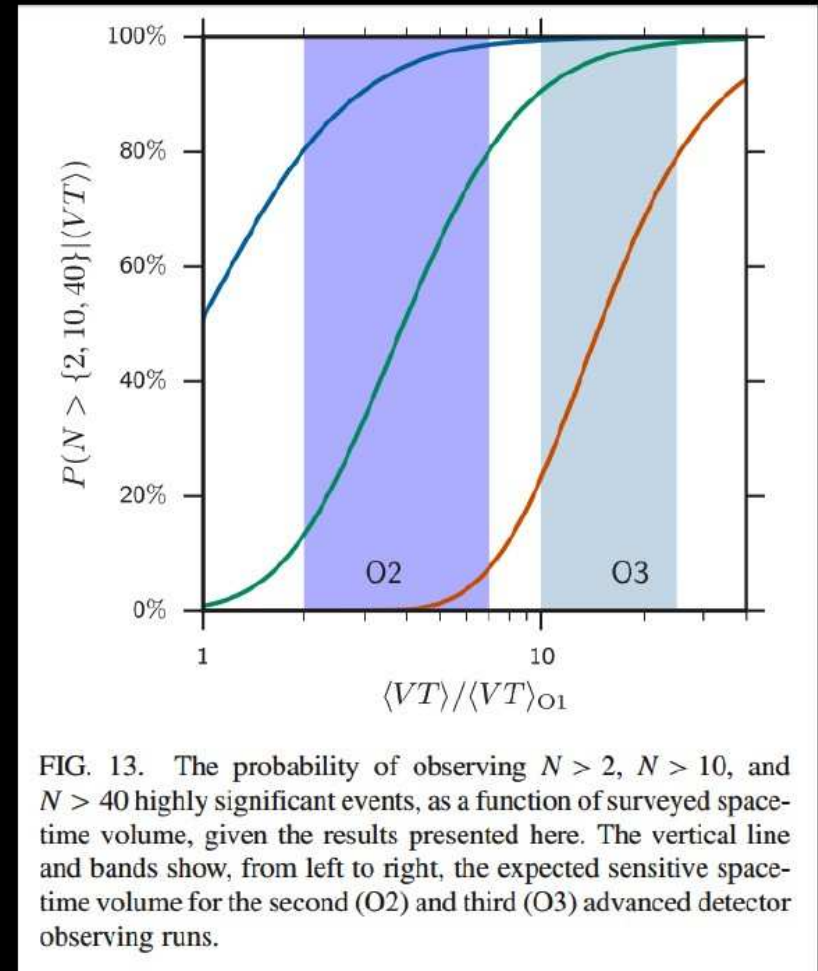
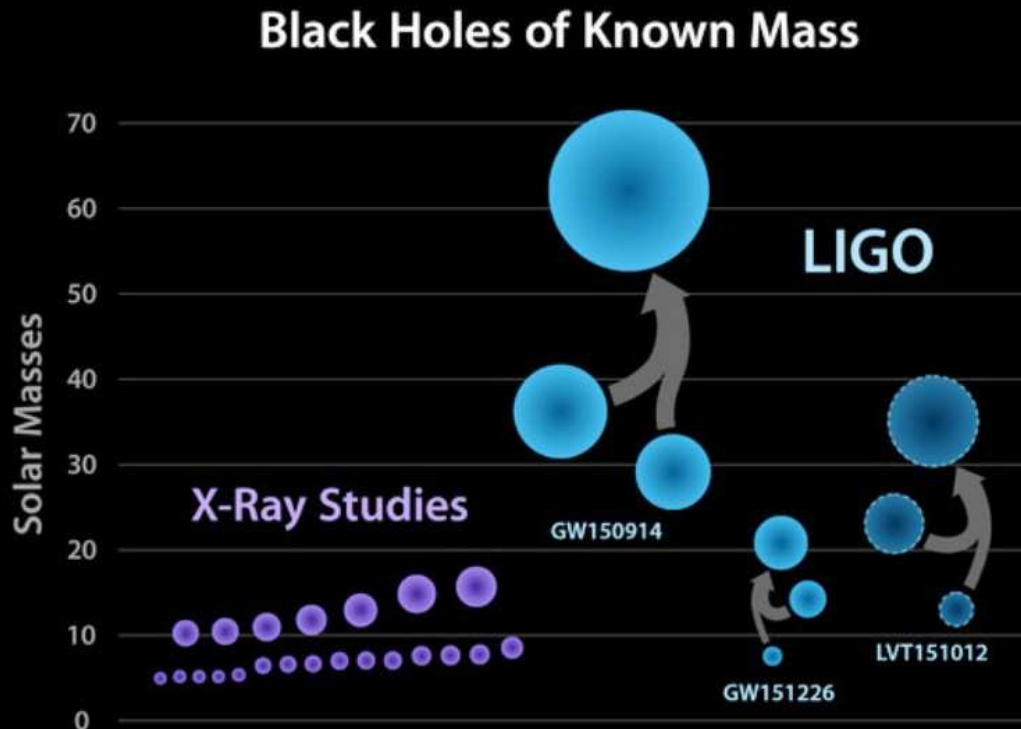
(GW150914: $\rho \simeq 24$, GW151226: $\rho \simeq 13$, LVT151012: $\rho \simeq 10$)

LIGO O1: 2 („i pół”) detekcji



$$a_i = \frac{c}{Gm_i^2} S_i, \quad \chi_i = \frac{c}{Gm_i^2} S_i \cdot L, \quad \chi_{\text{eff}} = \frac{\chi_1 m_1 + \chi_2 m_2}{m_1 + m_2}.$$

LIGO O1: 2 („i pół”) detekcji



Oszacowanie częstości zderzeń czarnych dziur: $9 - 240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$.
Duża szansa na więcej detekcji w sezonie O2.

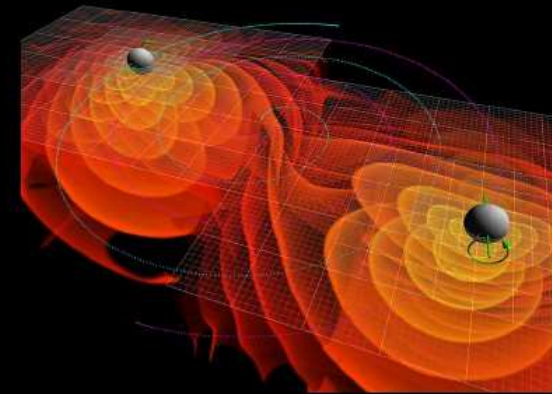
Źródła astrofizyczne: układy podwójne

Jednorazowe zjawiska kataklizmiczne dobrze opisywane modelami, np. ostatnie chwile układu podwójnego

- ★ dwóch czarnych dziur,
- ★ dwóch gwiazd neutronowych,
- ★ czarnej dziury i gwiazdy neutronowej.



(Hokusai „Wielka fala w Kanagawie”)



Symulacja „zlewania się” dwóch czarnych dziur (C.

Henze/NASA Ames Research Center)

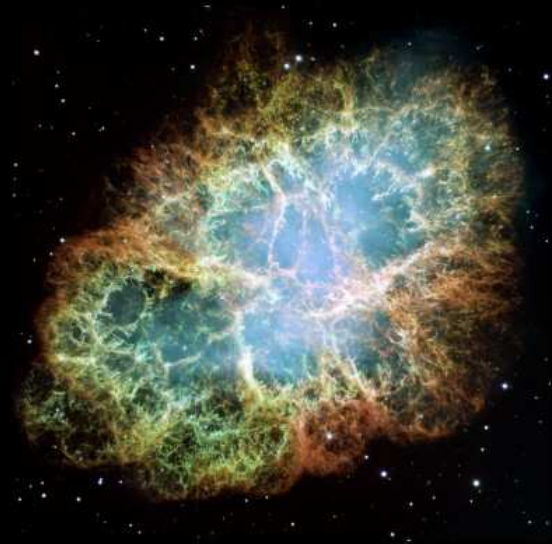
Źródła astrofizyczne: „wybuchy”

Jednorazowe zjawiska, które trudno modelować, np.

- ★ wybuchy supernowych,
- ★ długie błyski gamma.



(Isoda Koryûsai „Żuraw, fale i wschodzące słońce”)



Mgławica Krab, pozostałość po supernowej 1054CE

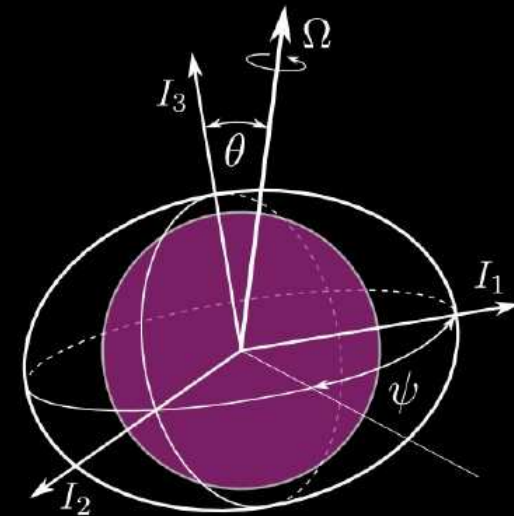
Źródła astrofizyczne: fale ciągłe



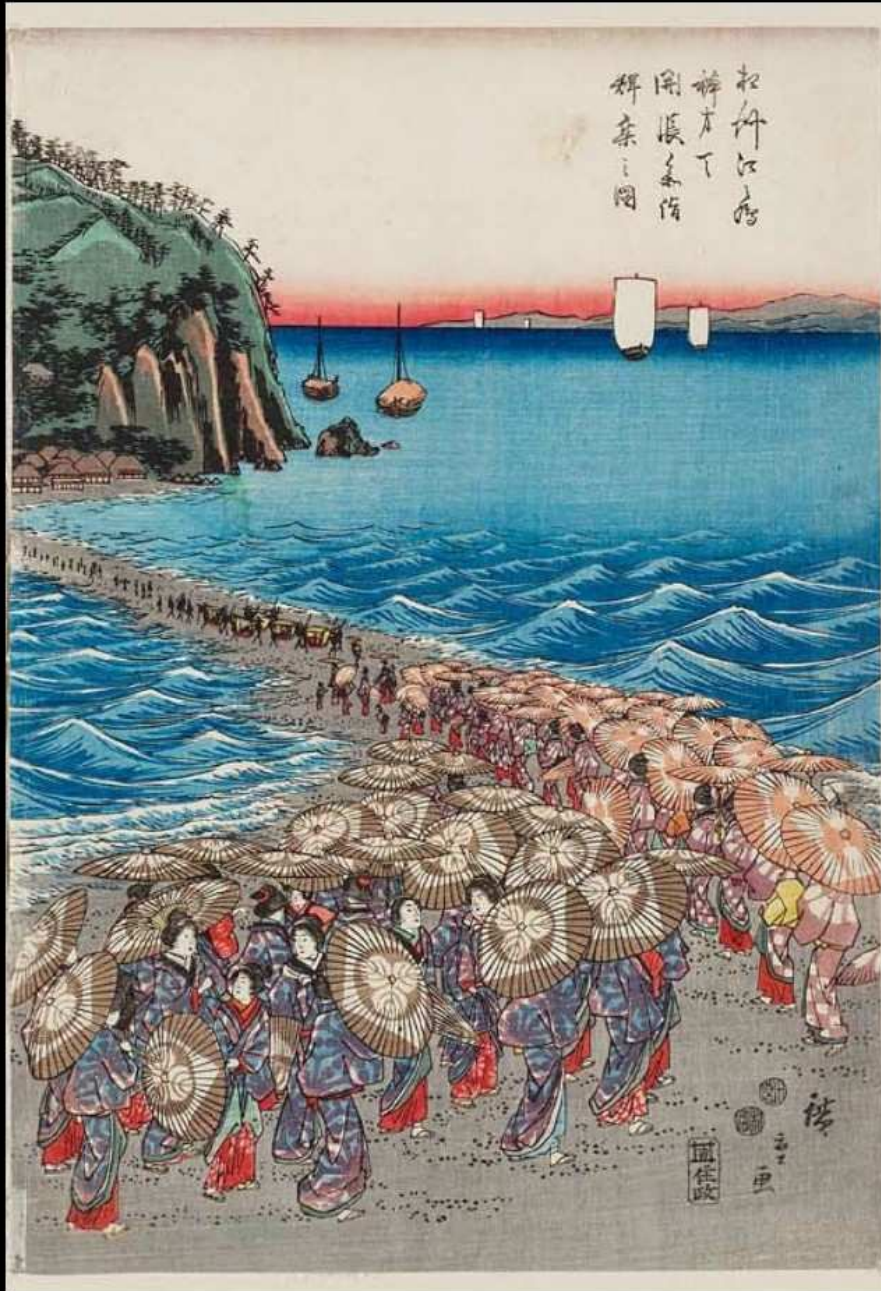
(Shoson „Lądujące żurawie”)

Zjawiska periodyczne, np.

- ★ rotujące nieosiowosymetryczne gwiazdy neutronowe („grawitacyjne pulsary”).



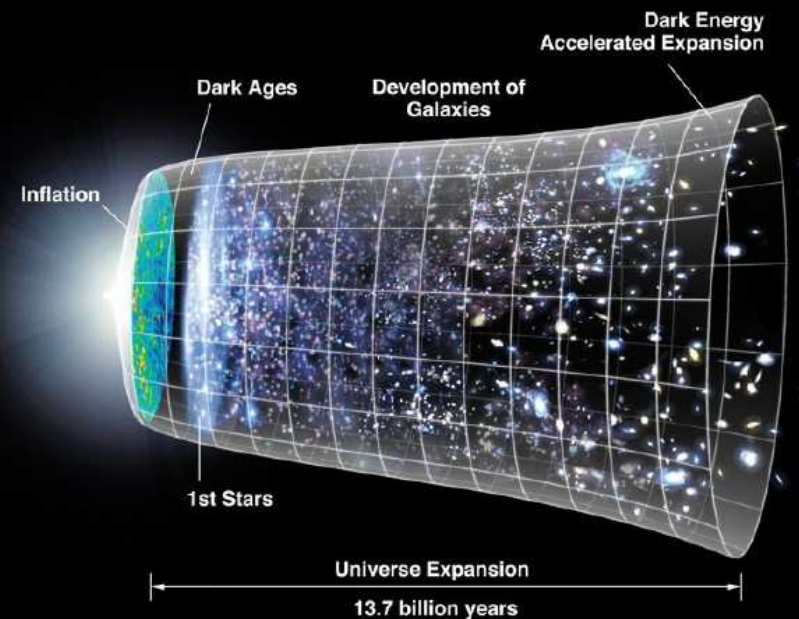
Źródła astrofizyczne: tło



(Utagawa Hiroshige I, „Tłum odwiedzający świątnię Benzaiten”)

Stochastyczne tło, czyli

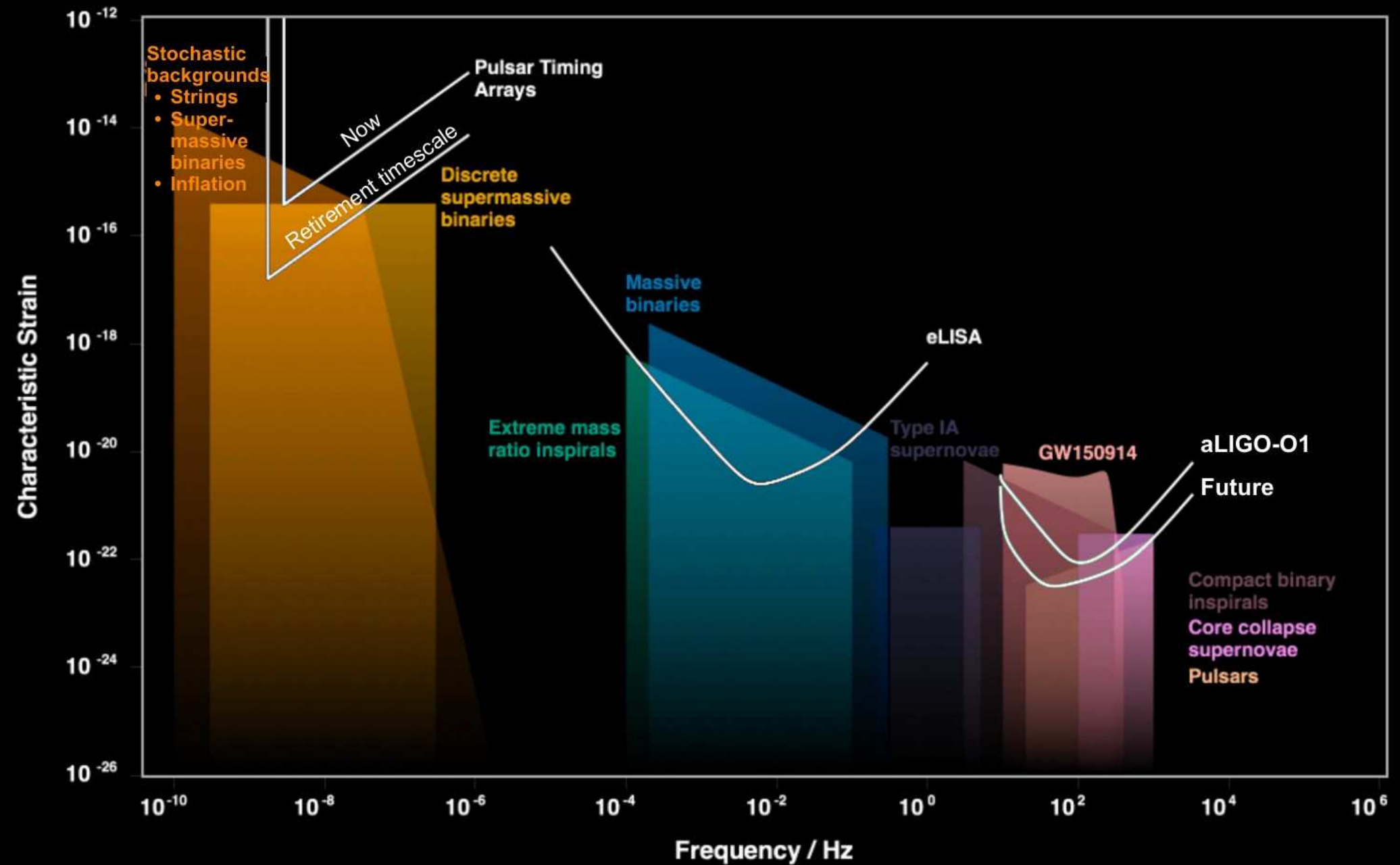
- ★ fale emitowane przez populacje obiektów,
- ★ fale pochodzące z wczesnego Wszechświata.



Źródła astrofizyczne: niespodzianki



(Sharaku „Aktor Otani Oniji III grający Yakko Edobei”)



Nowości z sezonu obserwacyjnego O2

- ★ Advanced LIGO O2 rozpoczęło się **30 listopada 2016**,
- ★ Do **23 stycznia 2017** zebrano **12 dni** danych „naukowych” (czas w których detektory L1 i H1 działały wspólnie); między 22 grudnia 2016 a 4 stycznia 2017 odbyła się zaplanowana przerwa świąteczna,
- ★ Przeciętny zasięg detektorów w O2 ($\pm 10\%$):
 - ★ **70 Mpc** dla układów $1,4 M_{\odot} + 1,4 M_{\odot}$,
 - ★ **300 Mpc** dla układów $10 M_{\odot} + 10 M_{\odot}$,
 - ★ **700 Mpc** dla układów $30 M_{\odot} + 30 M_{\odot}$.
- ★ Do tej pory mamy w O2 **2 sygnały** o prawdopodobieństwie fałszywego alarmu tak niskim, że informacja o nich została wysłana do obserwatorów „elektromagnetycznych”.
- ★ Więcej szczegółów wkrótce... 😊

Podsumowanie

Obserwacje GW150914 i GW151226 oznaczają:

- ★ potwierdzenie przewidywań teorii względności,
 - ★ pierwsze bezpośrednie detekcje fal grawitacyjnych,
 - ★ pierwsze obserwacje z pobliża dynamicznie zmiennego horyzontu,
 - ★ pierwsze obserwacje układów podwójnych czarnych dziur,
 - ★ nowy sposób pomiaru mas i temp rotacji (spinów) czarnych dziur,
 - ★ rejestracje „najjaśniejszych” zjawisk astrofizycznych w historii,
 - ★ nowe ograniczenie na masę grawitonu.
- ★ **Zupełnie nowy sposób badania Wszechświata: początek astronomii fal grawitacyjnych.**