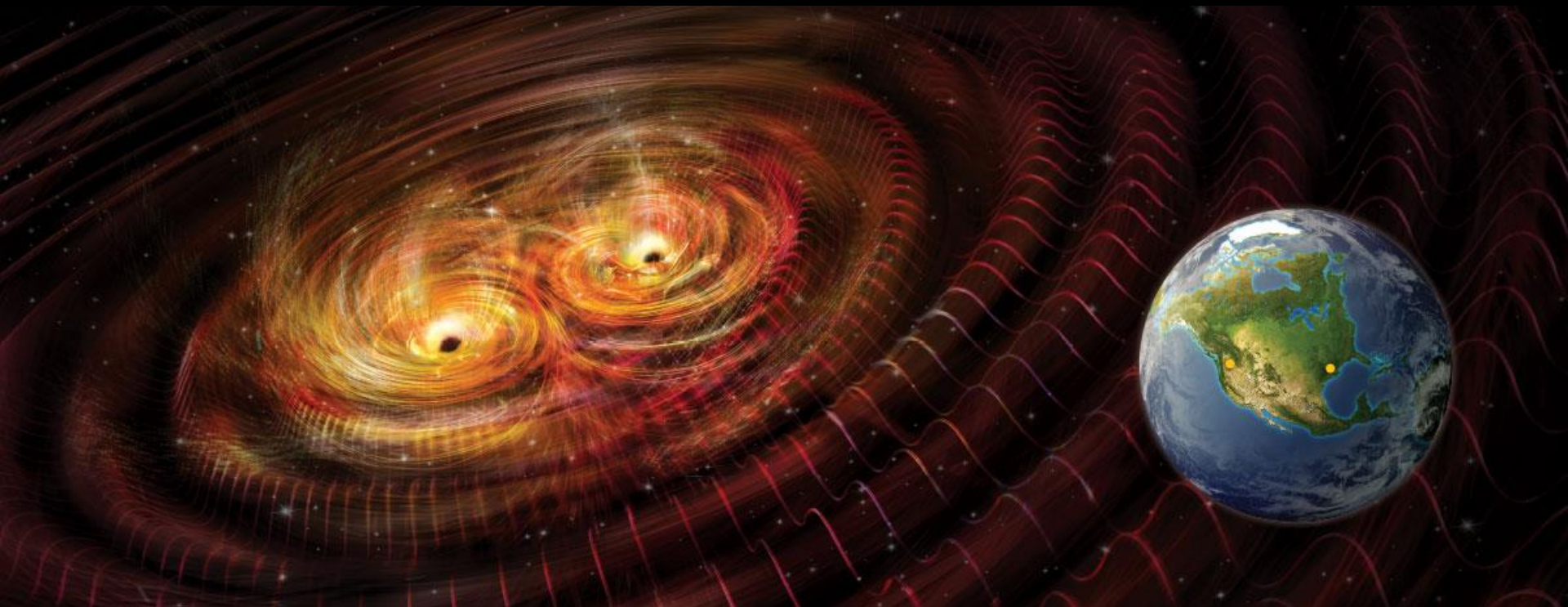


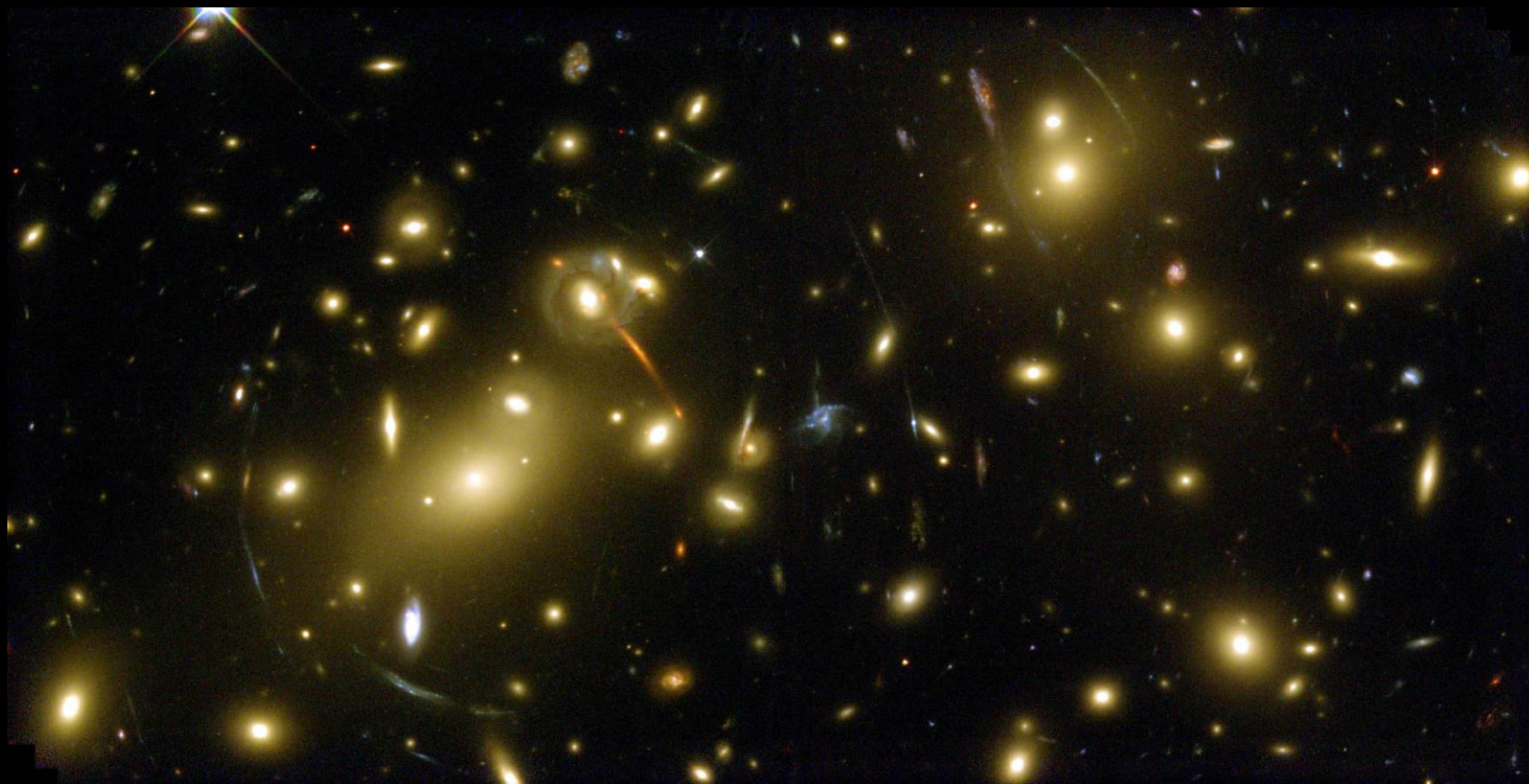
Czarne dziury i fale grawitacyjne



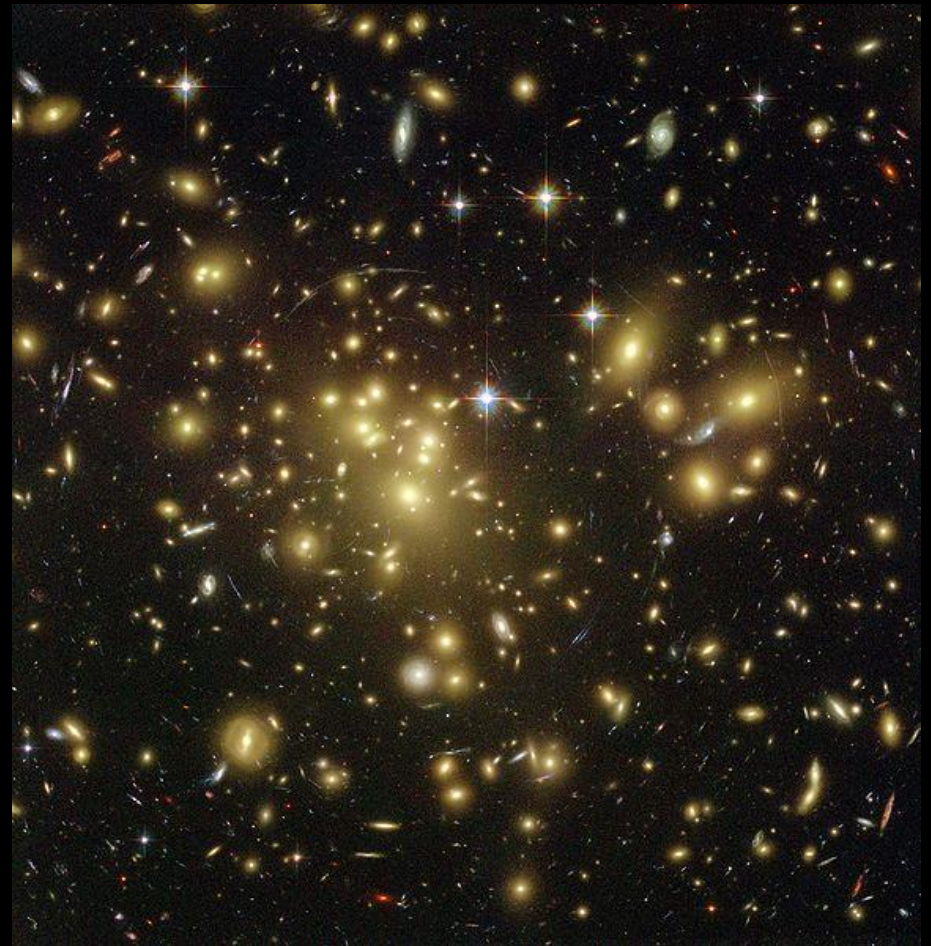
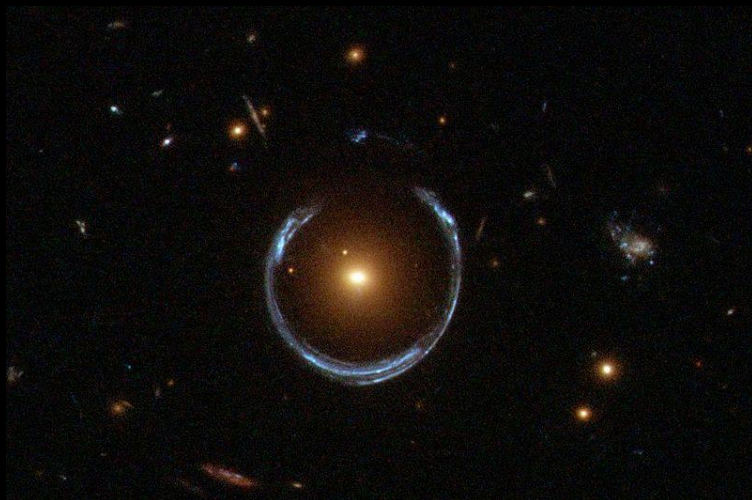
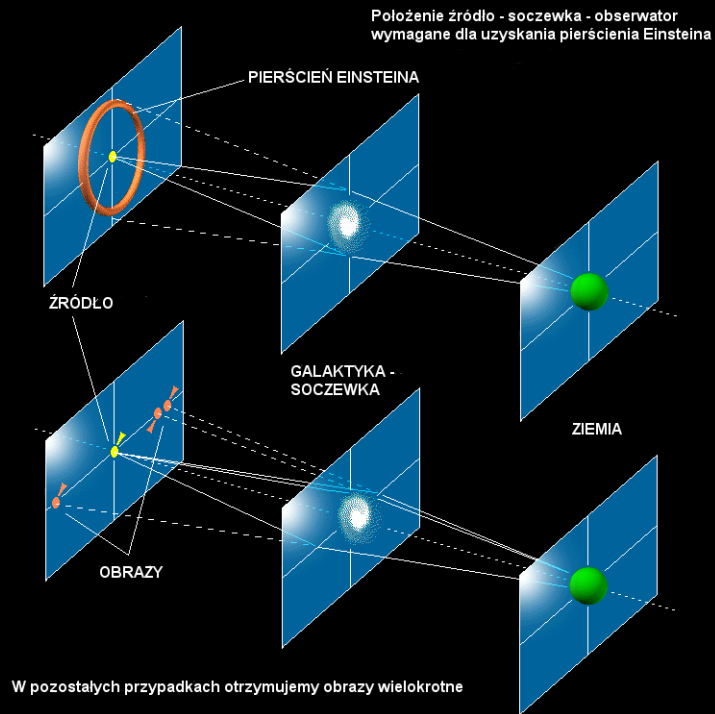
dr Krzysztof Rochowicz
Zakład Dydaktyki Fizyki UMK

Wszechświat jest ogromny. Do bólu piękny. Zdumiewająco prosty pod pewnymi względami, a pod innymi – misternie złożony.

Kip Thorne

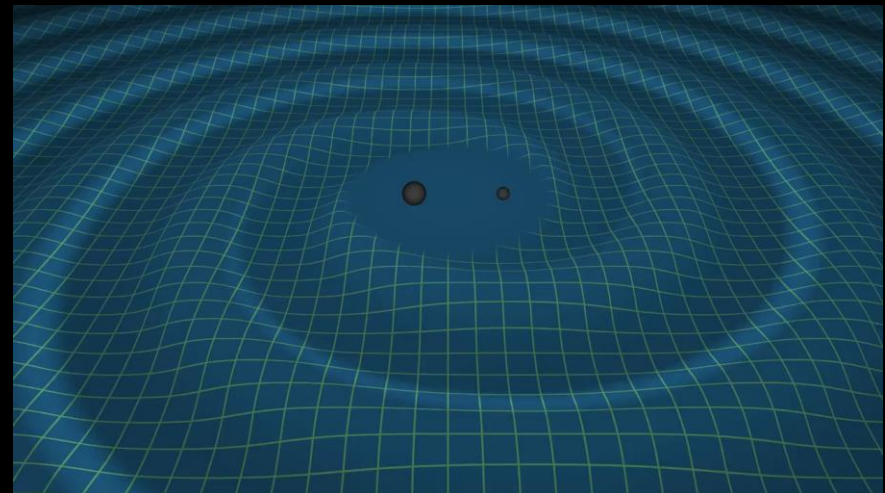
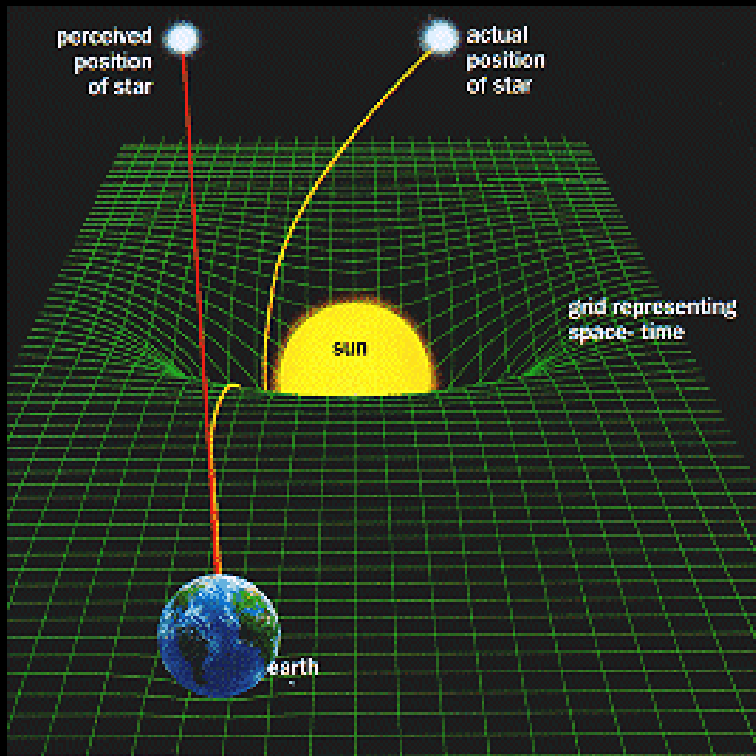


Soczewki grawitacyjne



*„Materia mówi przestrzeni jak się wygiąć;
przestrzeń mówi materii, jak się poruszać.”*

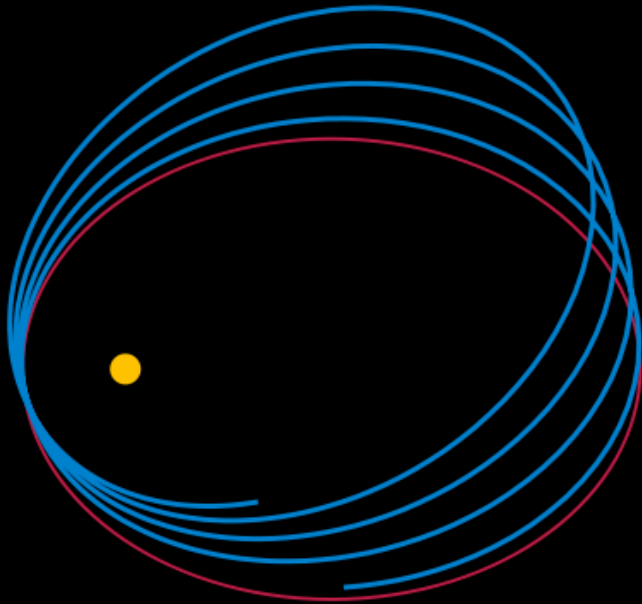
John Archibald Wheeler





Ogólna teoria względności

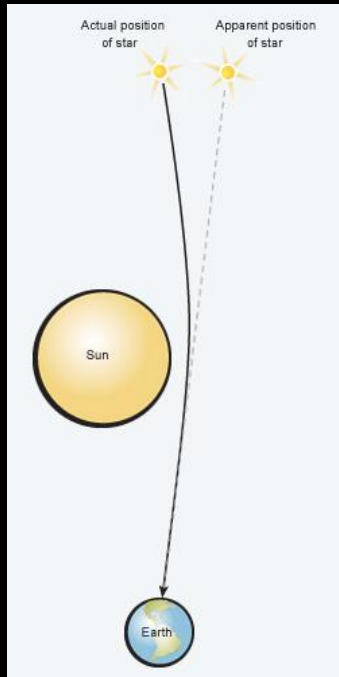
Formułowana w latach 1907-15,
wiąże geometrię czasoprzestrzeni
z rozkładem materii.



- Kłopoty z klasyczną teorią grawitacji w XIX w. – np. ruch peryhelium Merkurego: 43"/100 lat



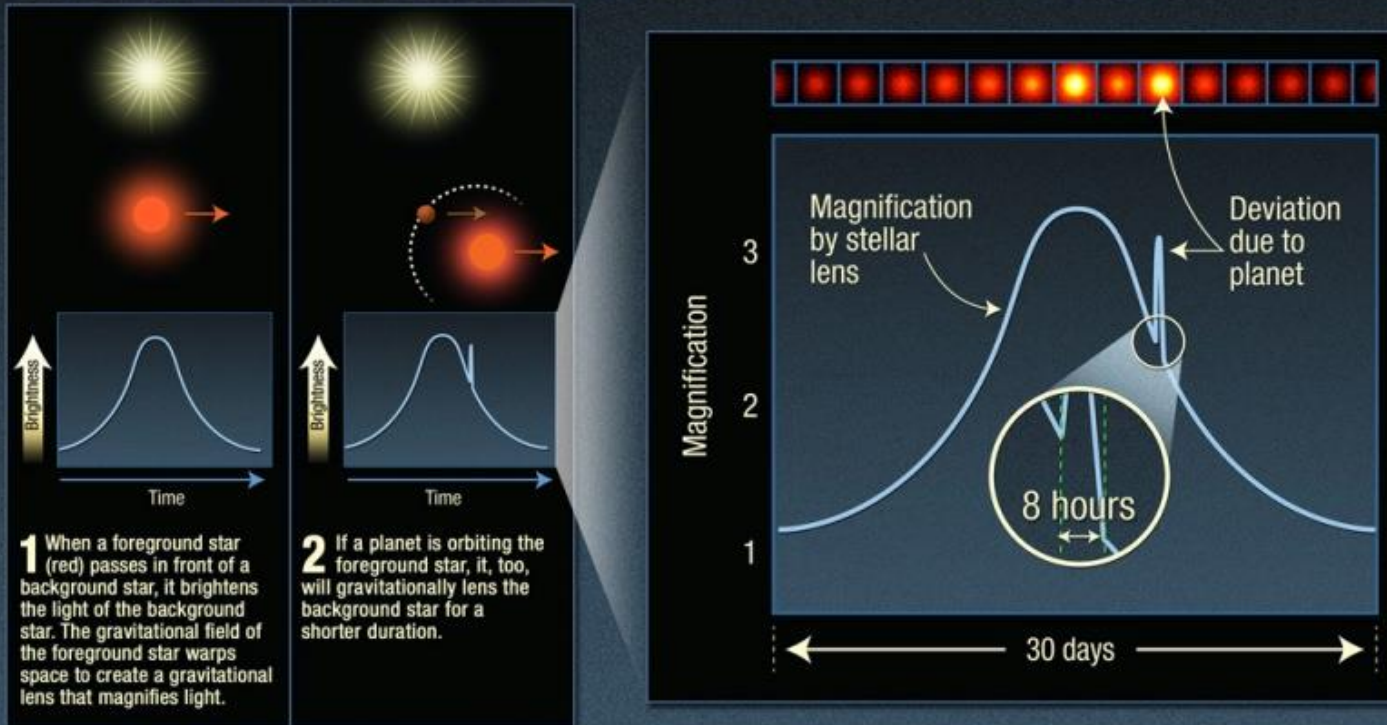
Potwierdzenie OTW



- Wyprawa Eddingtona na Wyspę Księżęcą w celu obserwacji całkowitego zaćmienia Słońca
- Publiczne ogłoszenie: 6.11.1919 na posiedzeniu *Royal Society*
- *The Times: Rewolucja w nauce*

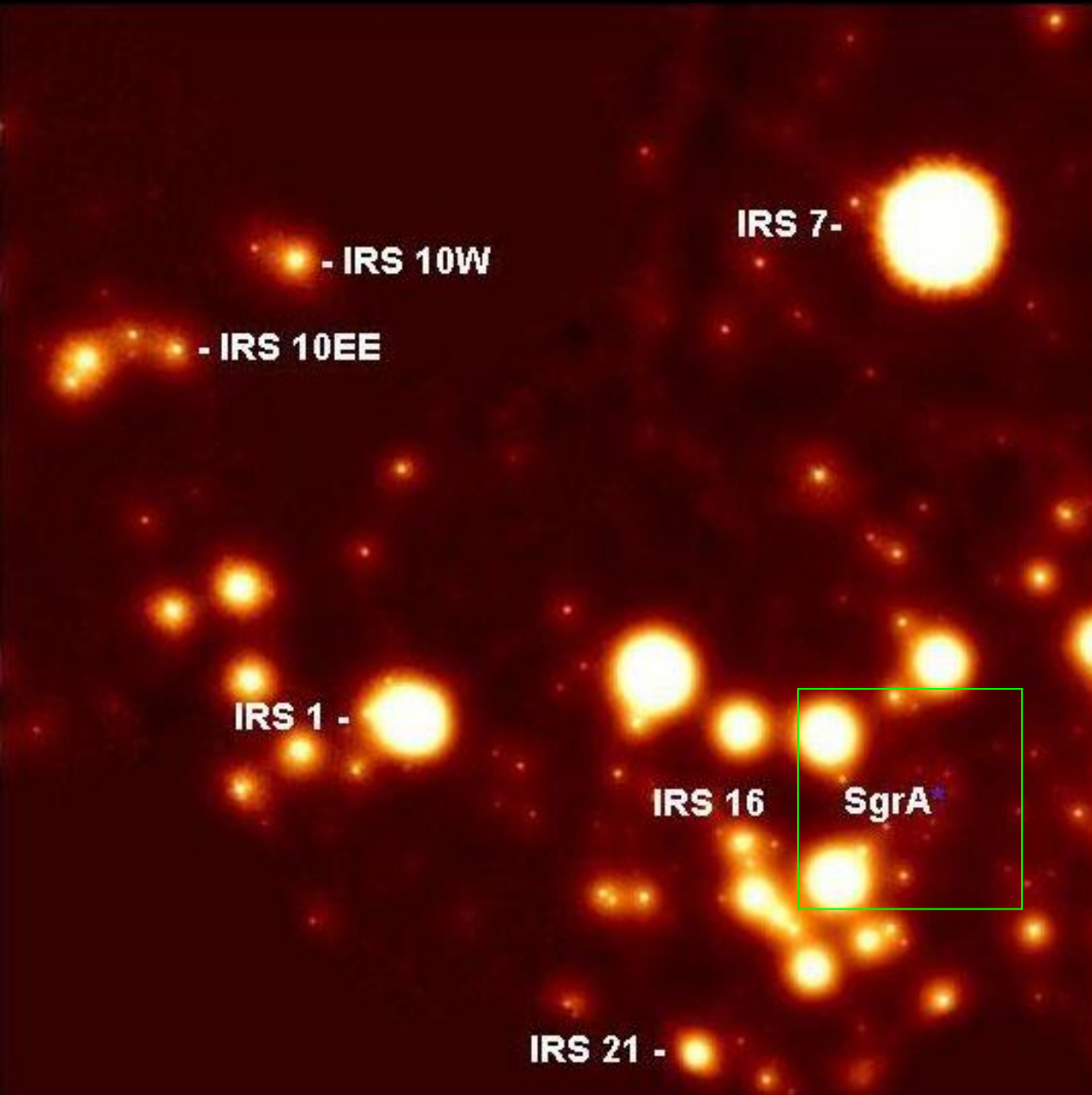
Mikrosoczewkowanie: od *MACHO* do planet

Extrasolar planet detected by gravitational microlensing



1 rok świetlny – 62 000 j.a.

Co się kryje w centrum Drogi Mlecznej?



Zdjęcie w podczerwieni
Obserwatorium Kecka

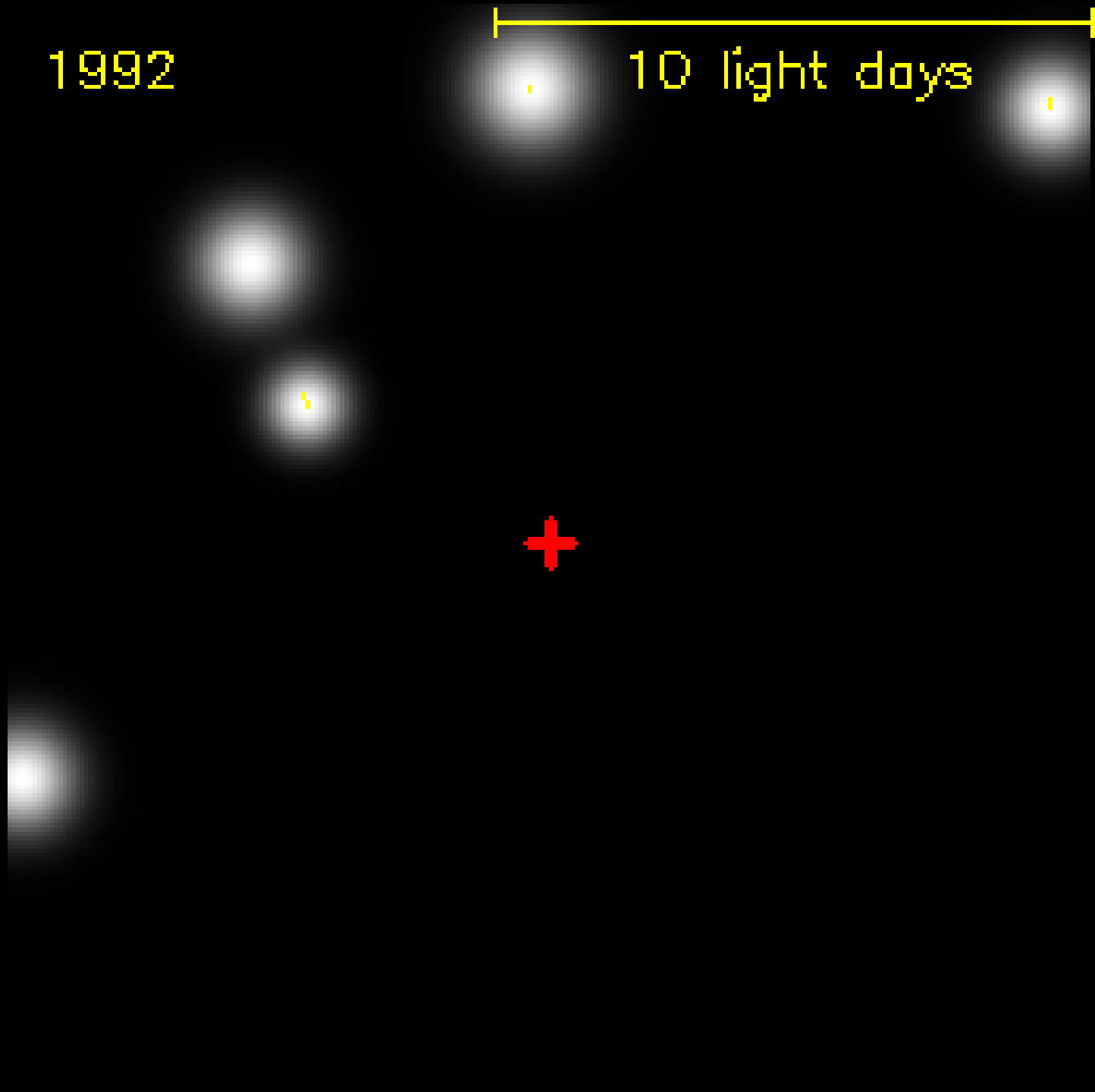
Tysiące gwiazd
w objętości
1 roku świetlnego

1992

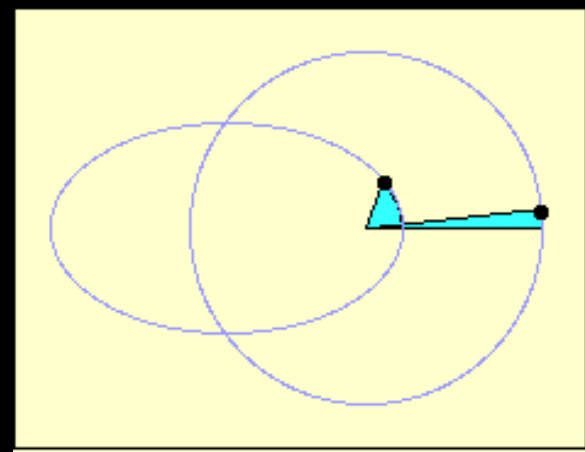
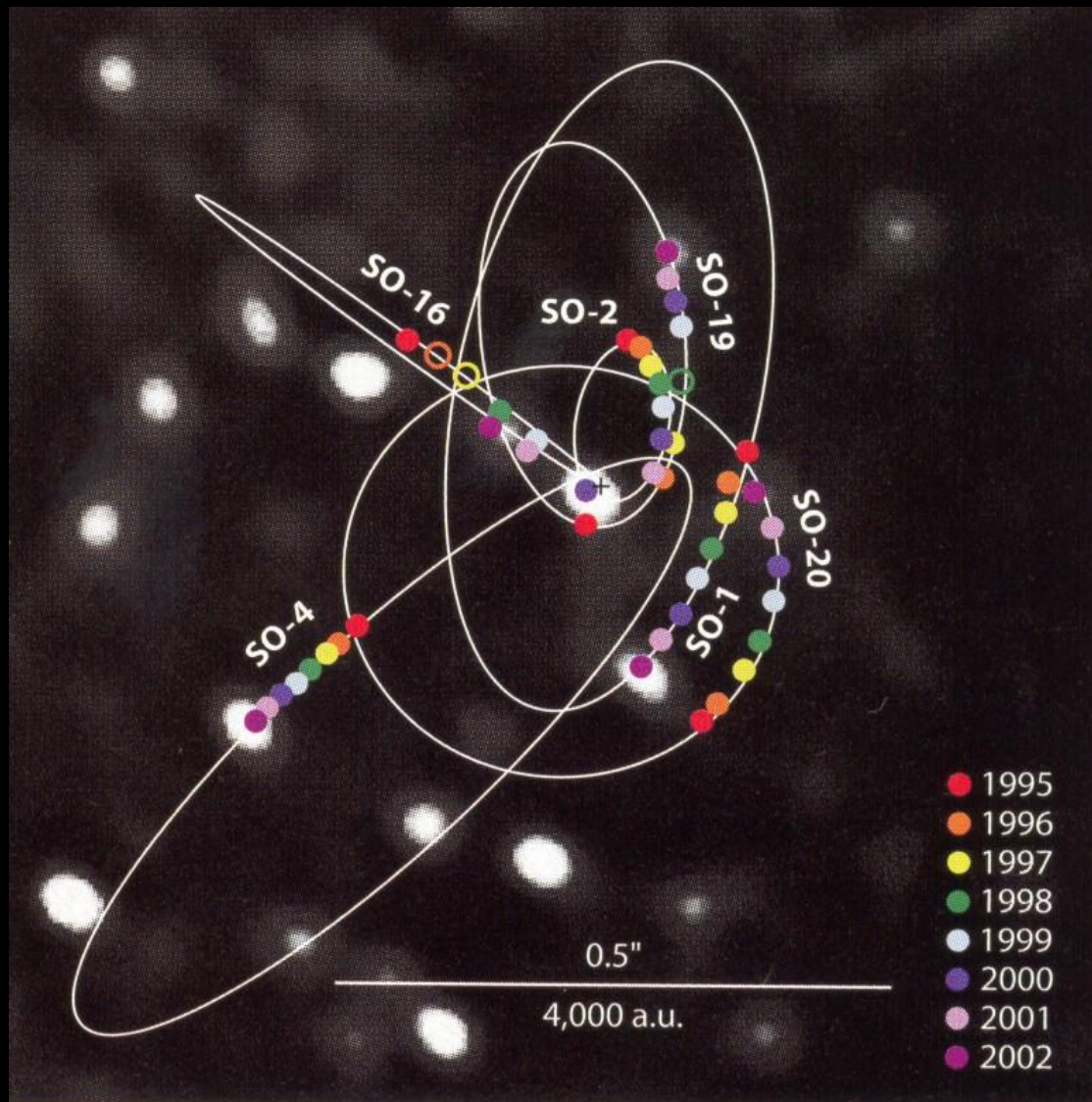
10 light days

Centrum Galaktyki:

*ruch gwiazd
po eliptycznych
orbitach
keplerowskich*



8 000 j.a.

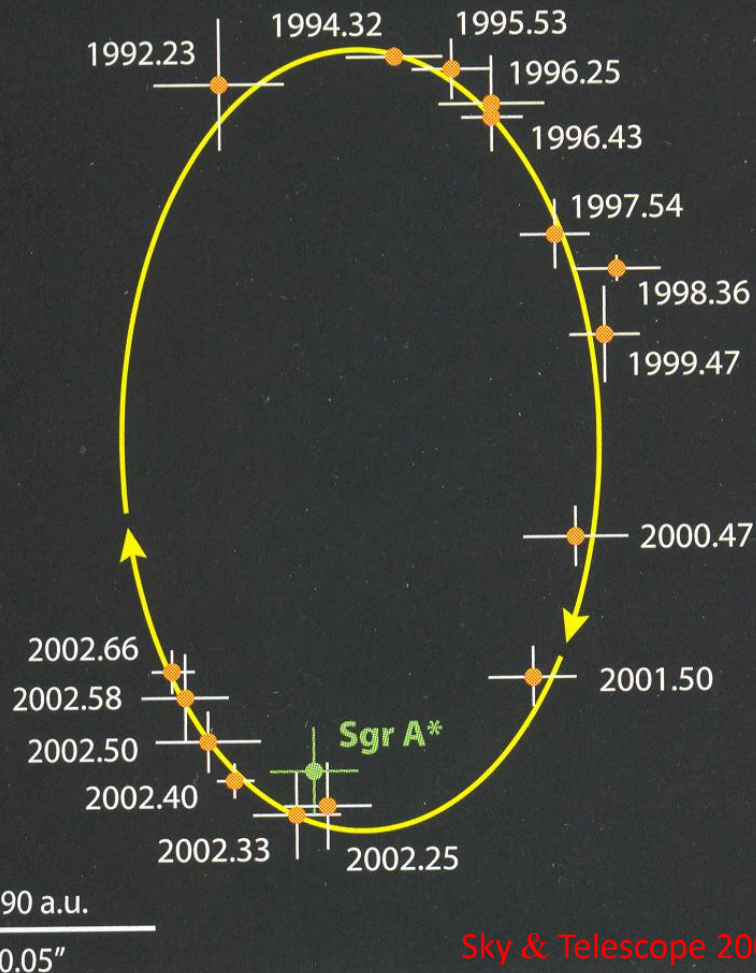


Pozycje 6 gwiazd wokół
Centrum Galaktyki

Okres obserwacji - 8 lat
Dokładność pomiaru
0.002 sekundy łuku

Obserwatorium Kecka

1300 j.a.

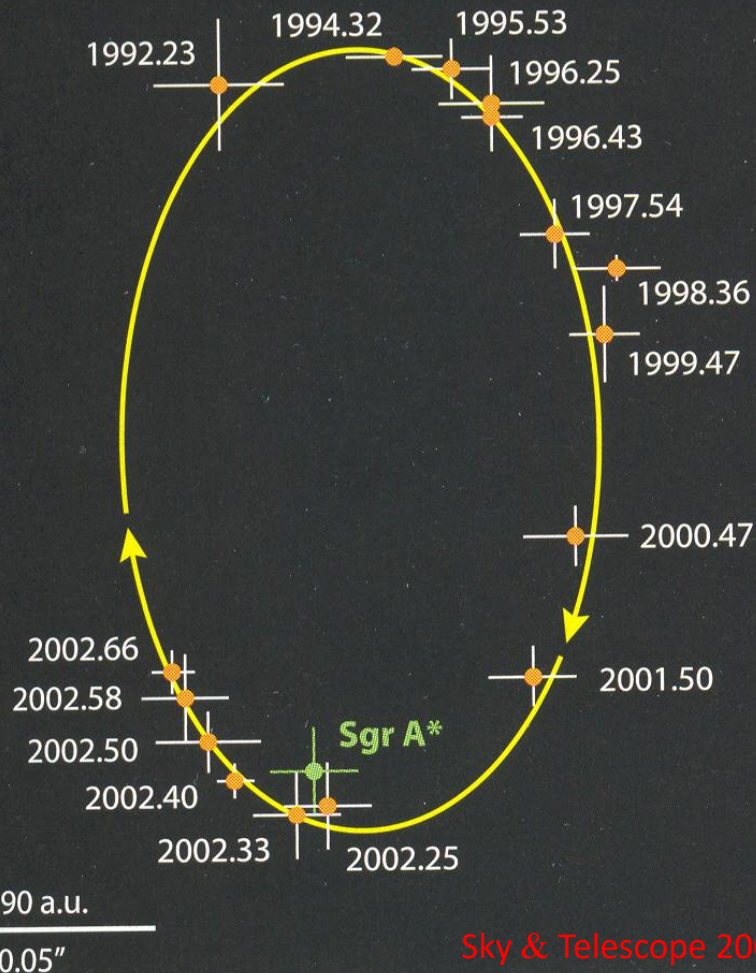


Dokładność pomiaru
0.002 sekundy łuku
Okres obiegu $P=15$ lat
Półoś wielka $a = 850$ j.a.

Okres obiegu Słońca wokół centrum
Galaktyki to 220 mln lat

Jaka jest masa obiektu w ognisku ?

1300 j.a.



Okres obiegu $P=15$ lat

Półoś wielka $a = 850$ j.a.

$$(M_C + m_g) = \frac{a^3}{P^2}$$

$$= \frac{(850)^3}{(15)^2} = 2.7 \times 10^6 M_S$$

$M_C \sim 3$ miliony mas Słońca
w objętości kilku Słońc

Koncepcja czarnej dziury

Ciało o masie M i promieniu R wytwarza pole grawitacyjne, które przyciąga inne ciało o masie m . Energia potencjalna tego przyciągania na powierzchni ciała o masie M wynosi

$$E_g = GMm / R$$

G jest stałą grawitacyjną.

Aby ciało o masie m mogło uciec z powierzchni ciała o masie M jego energia kinetyczna

$$E_k = mv^2 / 2$$

v jest prędkością ucieczki

musi być większa niż energia potencjalna przyciągania grawitacyjnego.

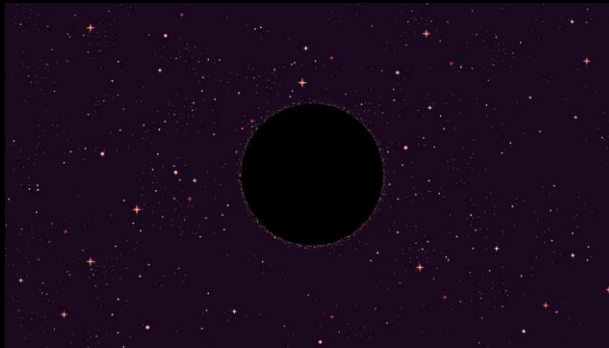
Ponieważ największą możliwą prędkością w przyrodzie jest prędkość światła $v=c$, więc promień masywnego ciała z którego nawet światło nie może uciec (*promień Schwarzschilda*) wynosi

$$R_s = 2GM / c^2 = (3\text{km})M / M_s$$

Obiekt o masie M i promieniu R_s nazywa się *czarną dziurą*.
Dla masy Słońca promień czarnej dziury wynosi 3 km.

Polecane filmy edukacyjne:

- Black Holes Explained – [część I](#) i [część II](#)



Gdzie i jak szukać czarnych dziur ?

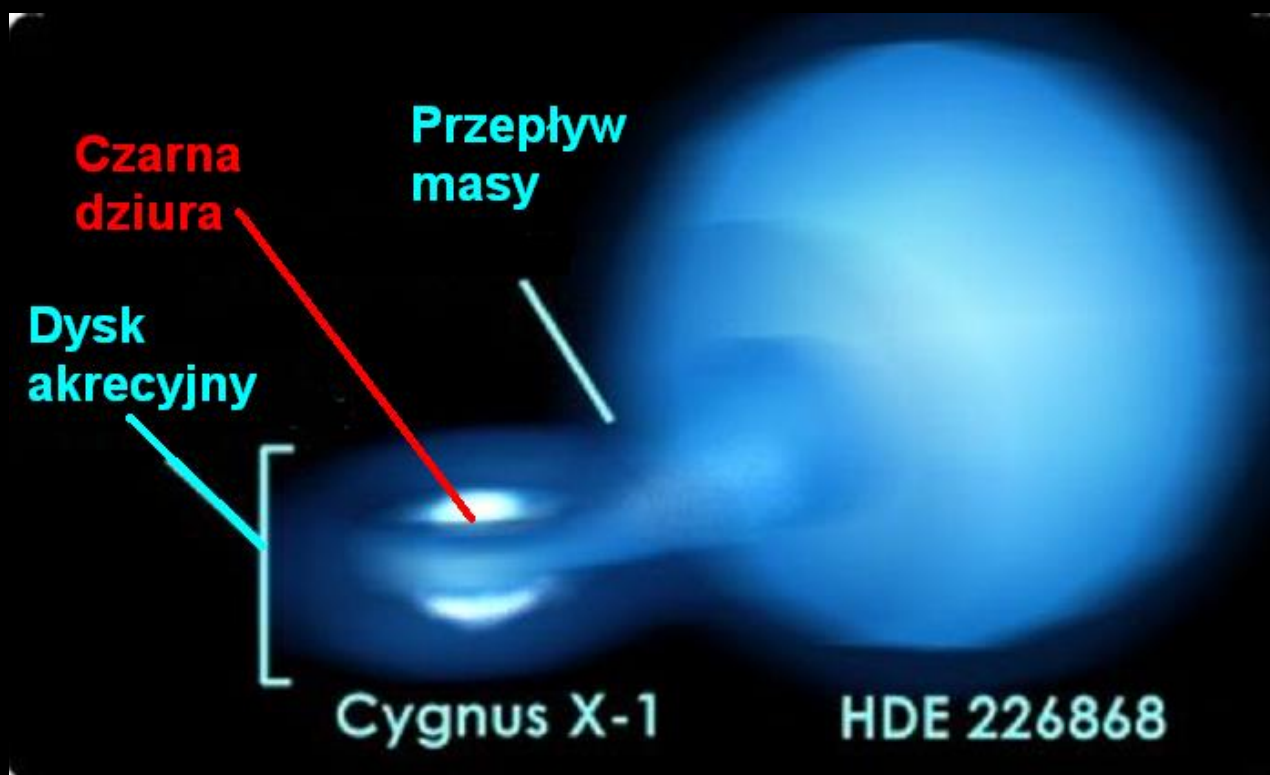
- Tam, gdzie nic nie widać – np. poprzez efekty soczewkowania grawitacyjnego.
- Tam, gdzie jest jasno!

Ogromna część obserwowanych źródeł rentgenowskich i gamma zawiera czarne dziury!

Świecą w tym wypadku oczywiście nie czarne dziury, a otaczająca je materia!

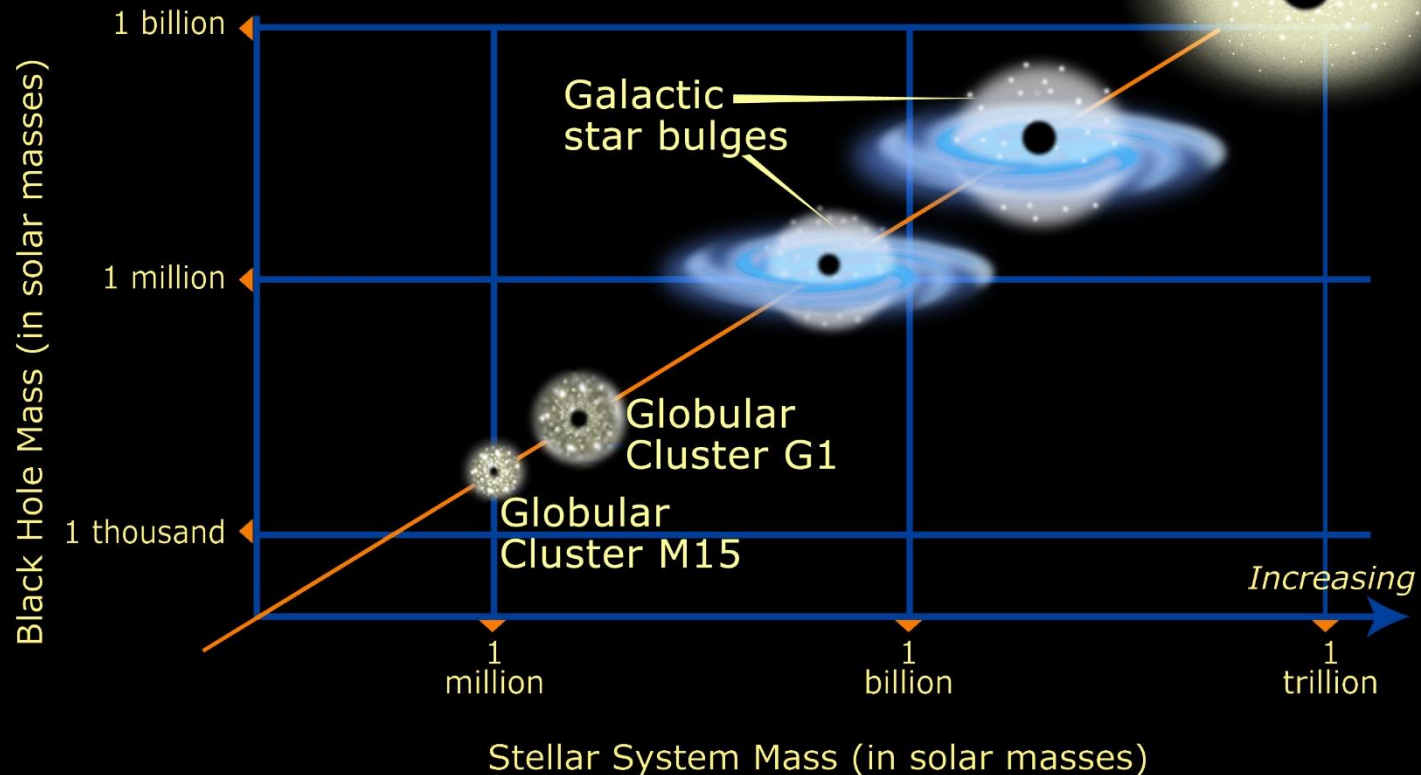
Obiekty astronomiczne zawierające czarne dziury

Znaczna część rentgenowskich układów podwójnych,
typowe masy „pogwiazdowych” czarnych dziur: 10-25 Ms



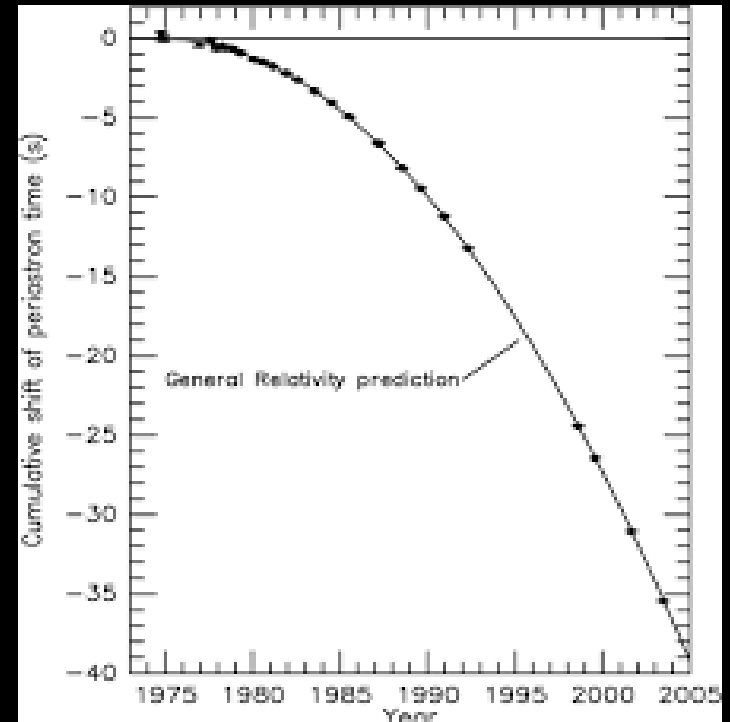
Supermasywne – jądra galaktyk

Correlating Black Hole Mass to Stellar System Mass



Fale grawitacyjne - odkrycie

- 14 września 2015 (obserwacja) czy 11 lutego 2016 (publikacja) ?
- Tak naprawdę: 1974 – odkrycie pulsara podwójnego PSR B1913+16 (Hulse, Taylor – Nagroda Nobla 1993)
- Okres 7,5 godziny, separacja składników: 1.1-4.8 R Słońca
- Skracanie okresu: $76.5 \mu\text{s}/\text{rok}$ odpowiada emisji fal o mocy $7,35 \cdot 10^{24} \text{ W}$ (orbita zacieśnia się o 3,5 m/rok, za 300 mln lat utworzy się jeden obiekt)



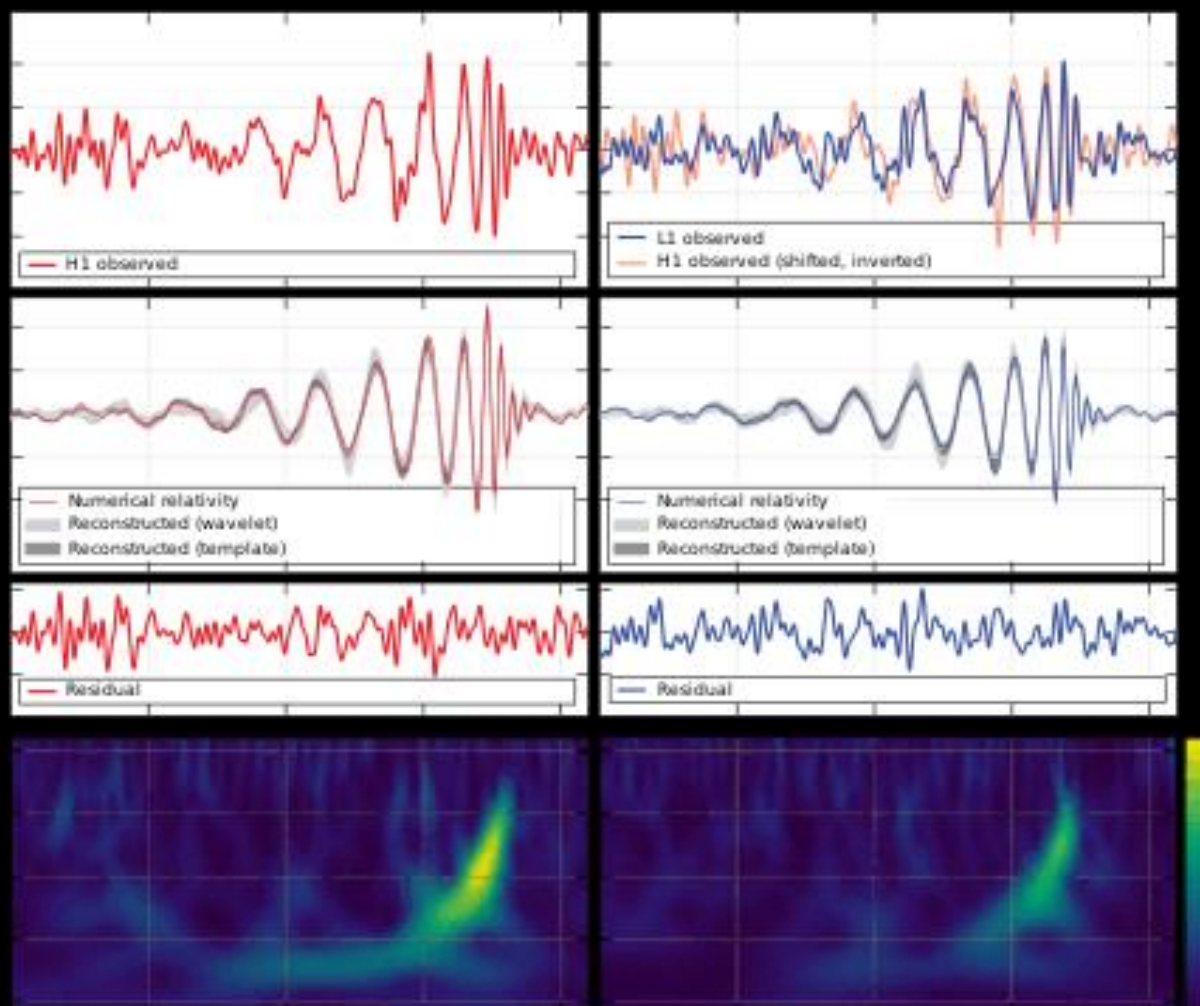
A long time ago in a galaxy far,
far away....



LIGO – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



Sygnal zarejestrowany 14.09.2015



Obiekty wyjściowe i końcowy – dopasowanie modelu

GRAVITATIONAL WAVES FROM COLLIDING BLACK HOLES

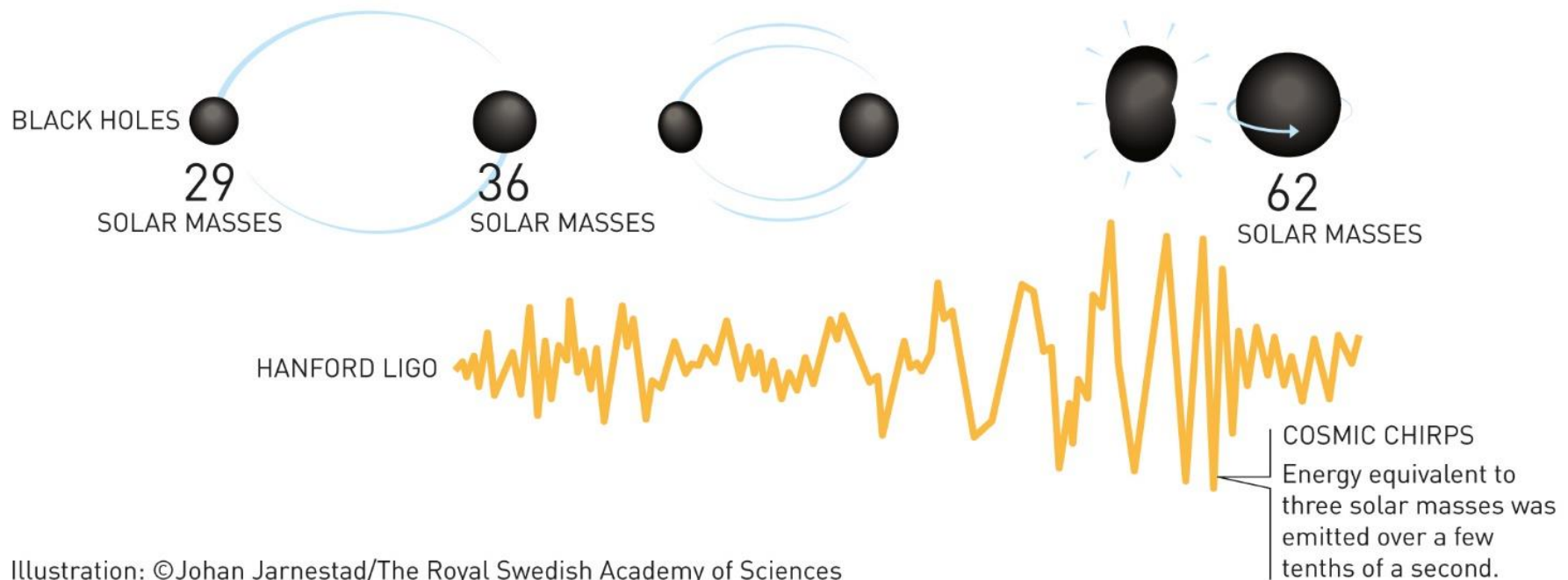
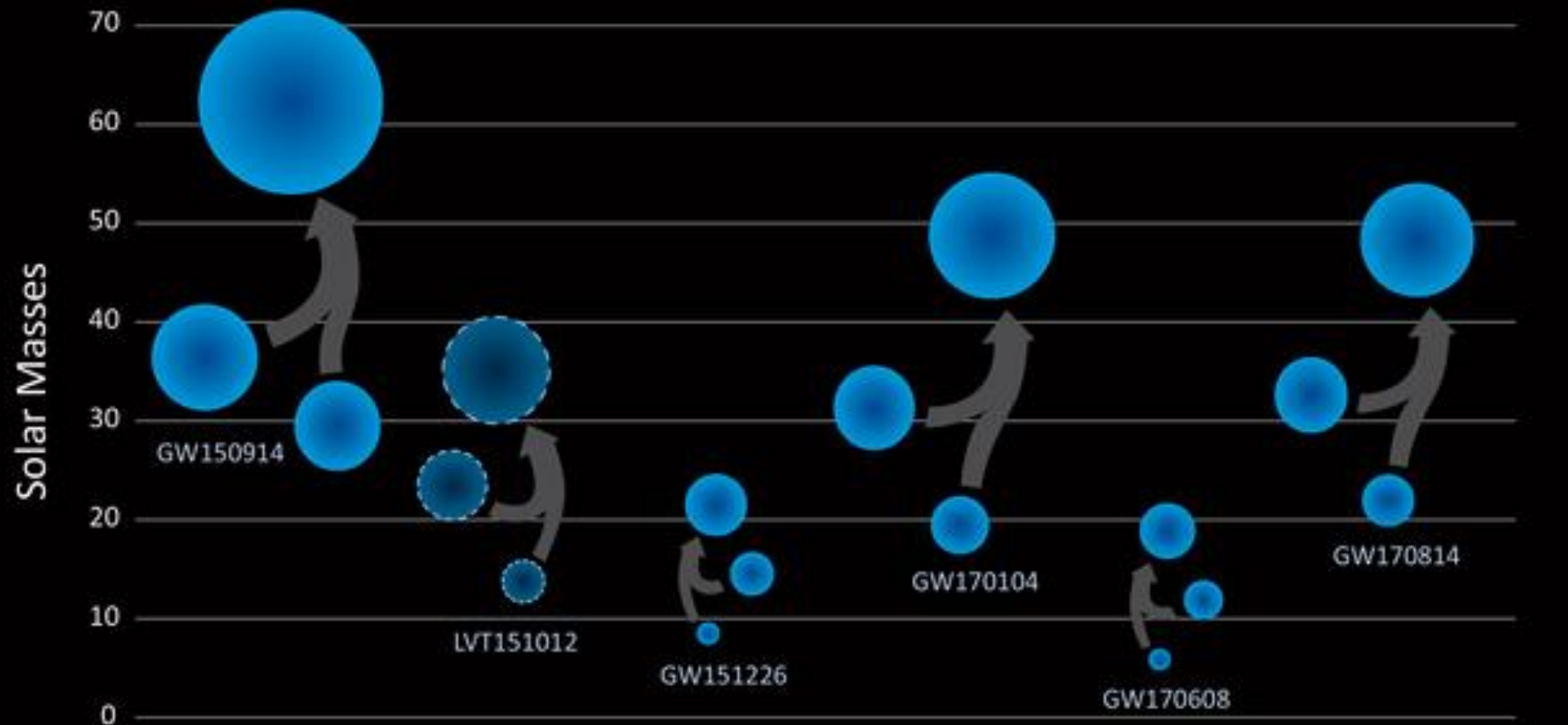
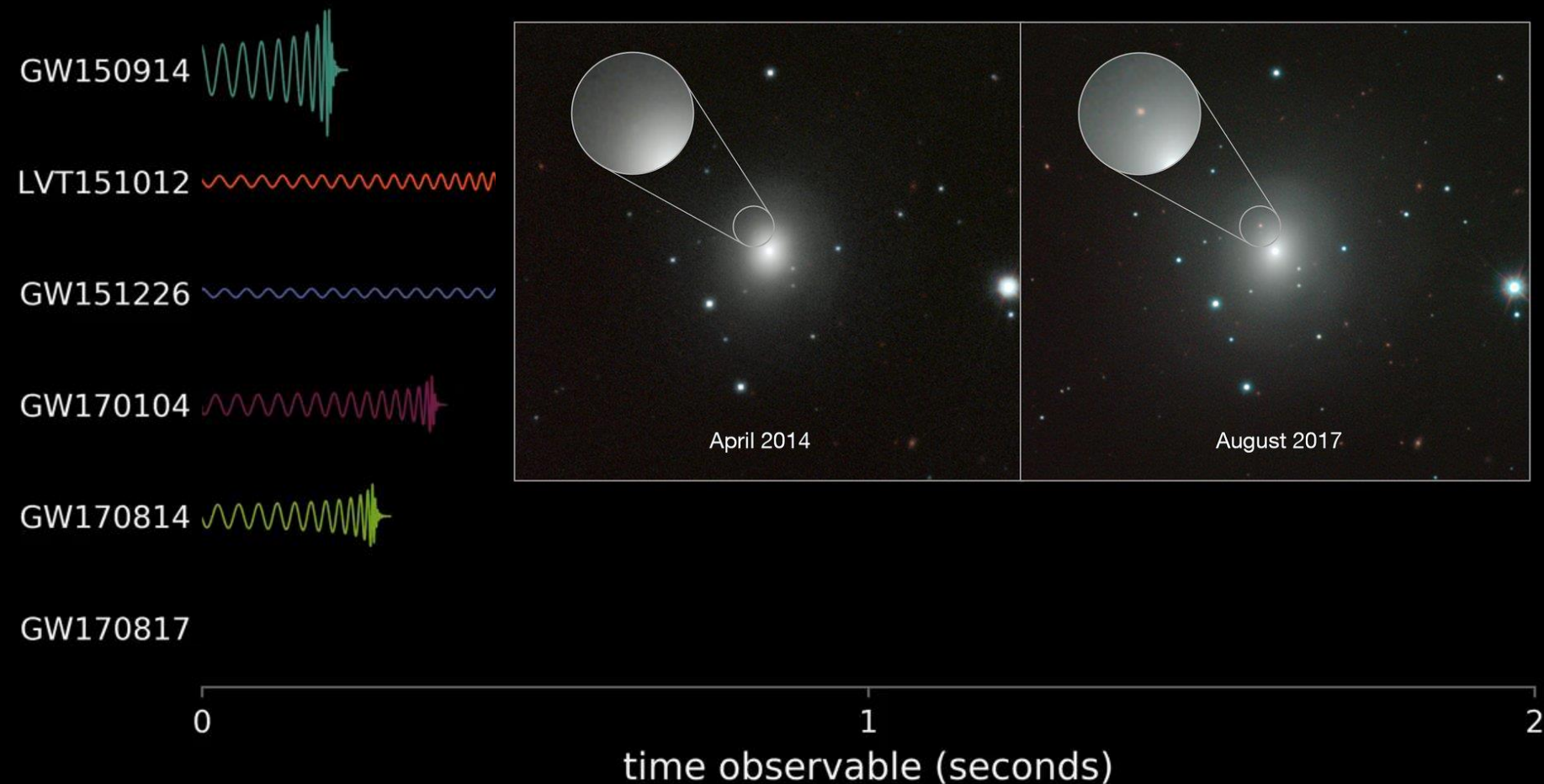


Illustration: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Black Holes of Known Mass

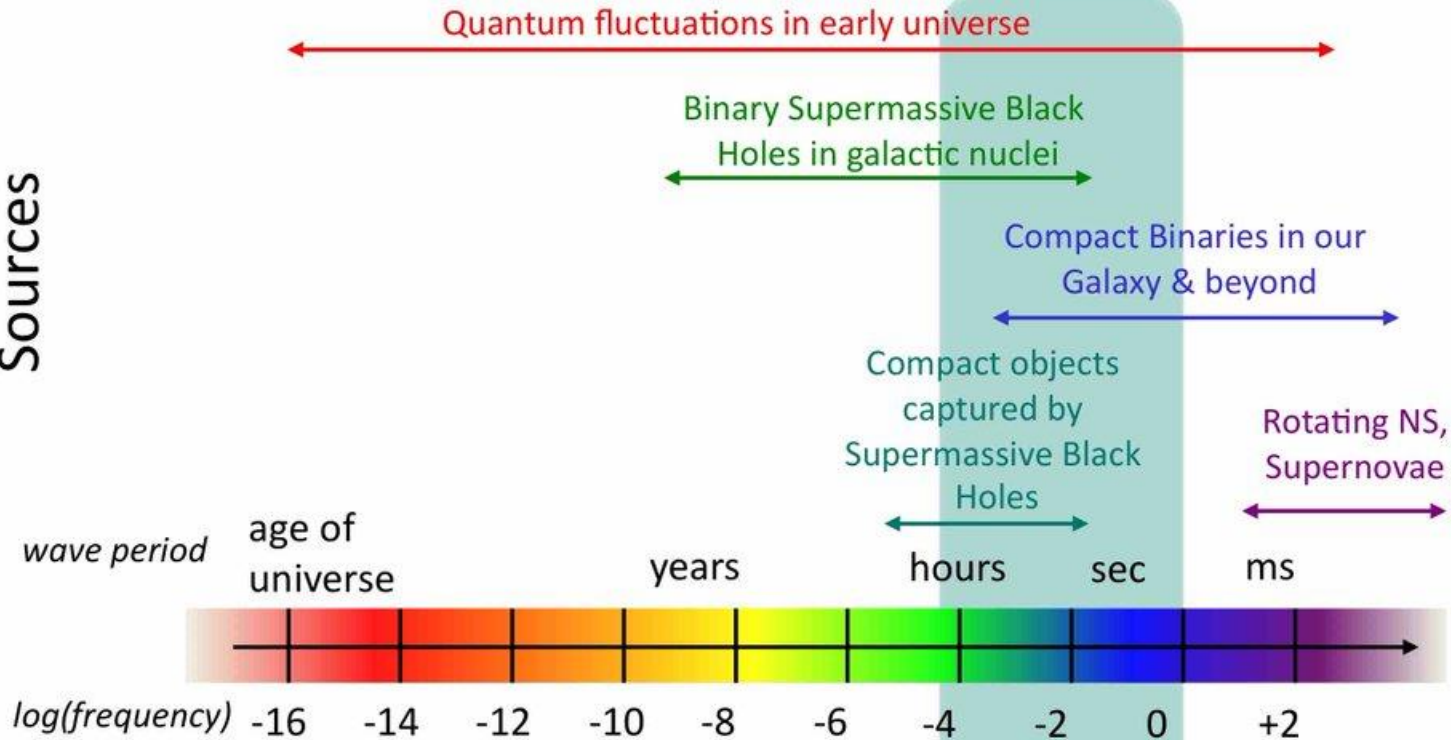


Zestawienie dotychczasowych detekcji

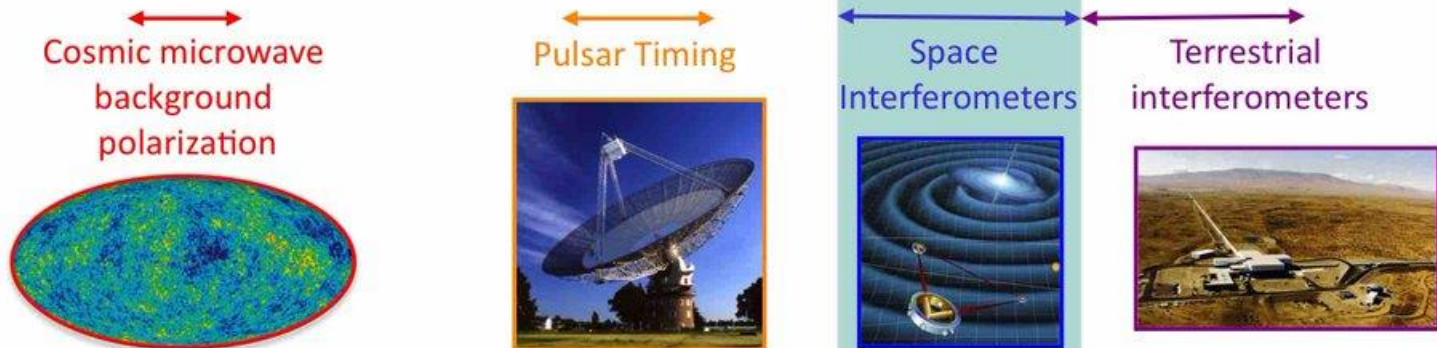


The Gravitational Wave Spectrum

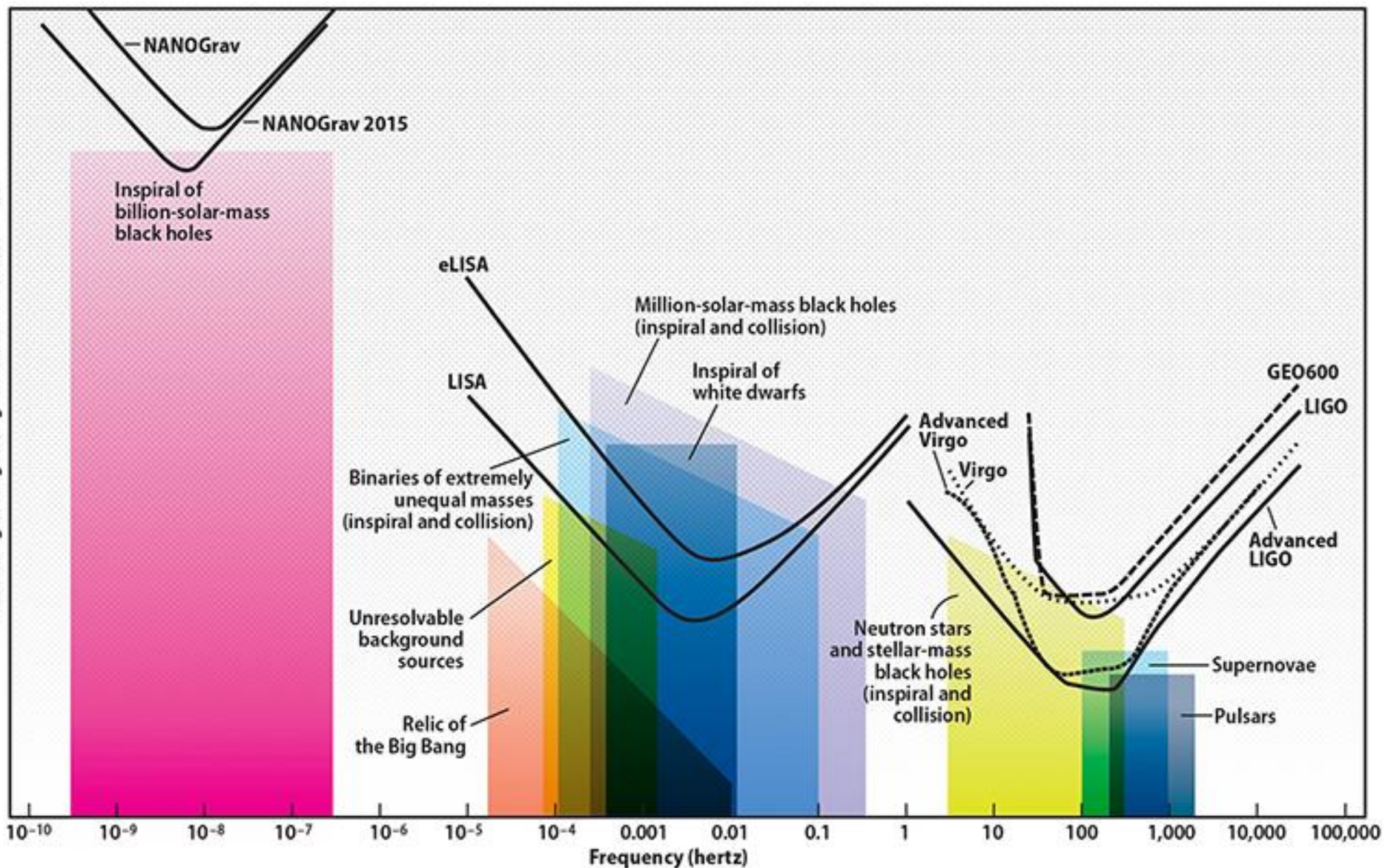
Sources



Detectors



Increasing strength of gravitational waves



Polecane źródła internetowe:

- Strony [LIGO](#), [Virgo](#), [Nagrody Nobla 2017](#)
- NuSTAR Bringing the High Energy Universe into Focus – [for teachers](#)
- NASA: [Black Hole Math Educator Guide](#)
(+Space Math, Solar Math, Lunar Math etc.)!!!
- TED - [How to take a picture of a black hole](#)
- Zagłądanie w ciemność – [modelowanie czarnych dziur w szkole podstawowej](#)

Poniżej zdjęcie czarnej dziury:

Dziękuję za uwagę!

