

Czarne dziury & gwiazdy neutronowe

Michał Bejger (CAMK PAN)

Centrum Nauki Kopernik, 4.12.14



CENTRUM NAUKI
KOPERNIK



Obecny opis Wszechświata

Kwarki	$2.3 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u górny	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c powabny	$173.5 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t szczytowy	Bozony cechowania	0 0 1 γ foton	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 bozon Z
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d dolny	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s dziwny	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b spodni		0 0 1 g gluon	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm bozon W
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ mion	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ taon		$?126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H^0 bozon Higgsa	
Leptony	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elektronowe	$<170 \text{ keV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino mionowe	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino taonowe			



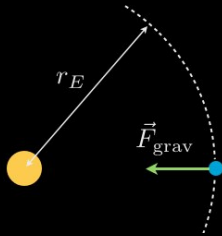
Gravity.
 It's not just a good idea.
 It's the Law.

Masa
 Ładunek
 Spin

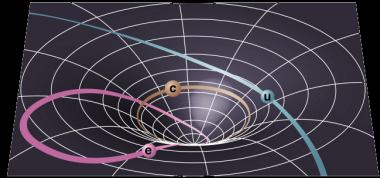
4 siły - 3 oddziaływania Modelu Standardowego (elektromagnetyczne, słabe i silne) + **gravitacja**.

Opis grawitacji Newtona i Einsteina

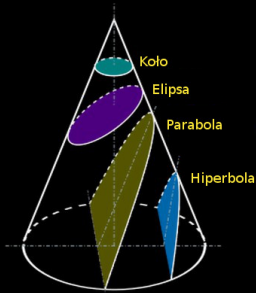
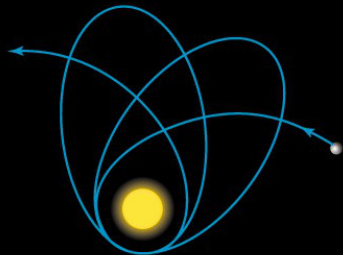
Według Newtona: $F_{grav.} = -\frac{Gm_1 m_2}{r^2}$



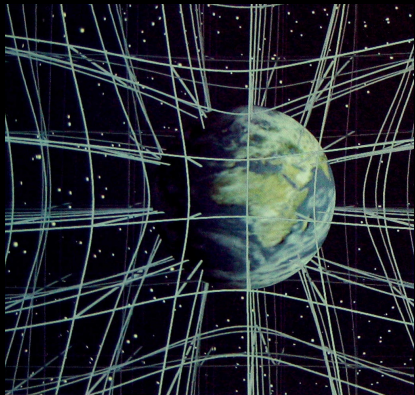
Według Einsteina: ciała poruszają się swobodnie po „najprostszej” trajektorii (geodezyjnej) w zakrzywionej przestrzeni.



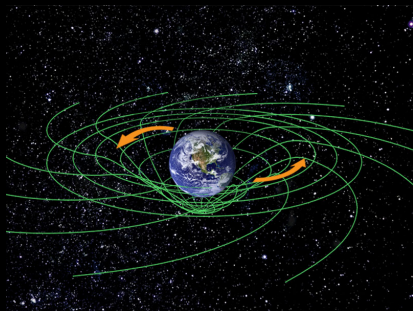
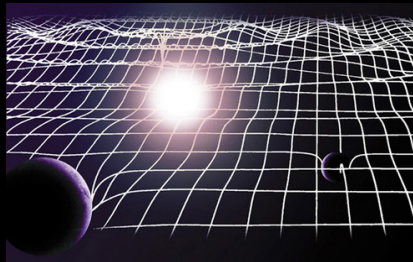
Orbity nie są zamknięte (precesja)



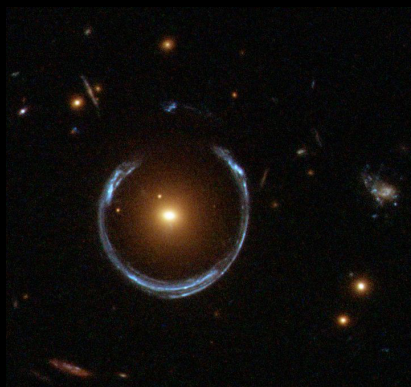
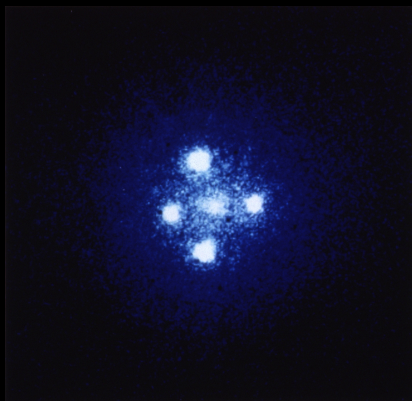
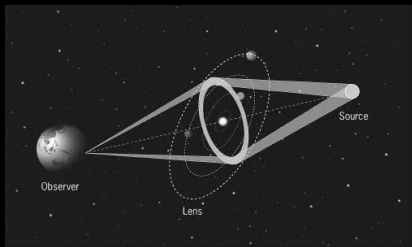
Grawitacja Einsteina - geometria zakrzywionej przestrzeni



„Masy zakrzywiają przestrzeń,
przestrzeń kieruje ruchem mas”

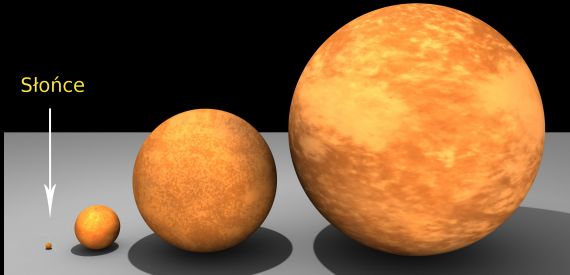


Obserwowane efekty teorii grawitacji Einsteina: soczewkowanie

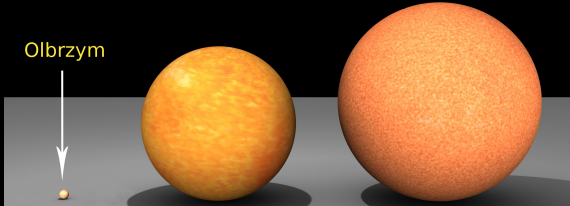


Gwiazdy - masy i rozmiary

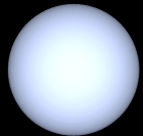
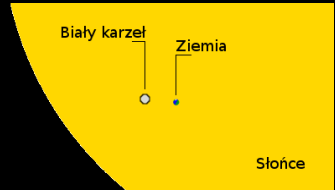
Olbrzym (np. Arktur)



Nadolbrzym (np. Antares)

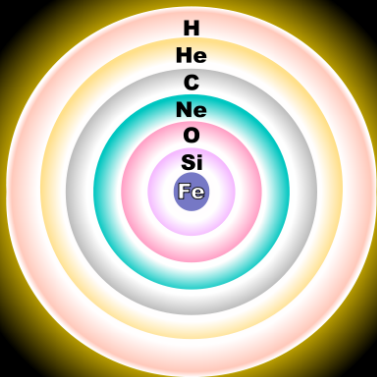


Masy gwiazd (zależne od wielu czynników):
 $150 - 0.1 M_{\odot}$



$M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$
 $R \approx 5800 \text{ km}$
 $V_{\text{esc}} \approx 0.02c$

Nasz związek ze Wszechświatem



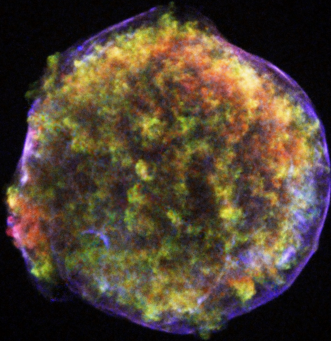
Kolejne etapy „palenia” pierwiastków w wnętrzu dostatecznie masywnej gwiazdy

Pierwiastki chemiczne, z których składamy się my, inne zwierzęta, rośliny i planety powstały we wnętrzach gwiazd.

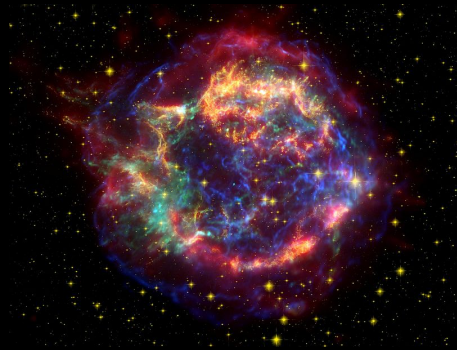


Carl Sagan: „*Jesteśmy częścią Wszechświata - Wszechświat jest częścią nas*”

Supernowe - kosmiczne eksplozje



Supernowa typu Ia (kolaps białego karła: SN 1572, obserwowane przez Tycho Brahe), doskonałe *świece standardowe*.



Cassiopeia A - Supernowa typu II (kolaps masywnej gwiazdy, ok. ≈ 1680 r.)

Supernowe typu II zostały wkrótce po pierwszej teoretycznej pracy nt. bardzo gęstych gwiazd (L. D. Landau, 1932), i odkryciu neutronu (J. Chadwick, 1932) powiązane z gwiazdami neutronowymi (F. Zwicky & W. Baade, 1934).

Supernowe - kosmiczne eksplozje



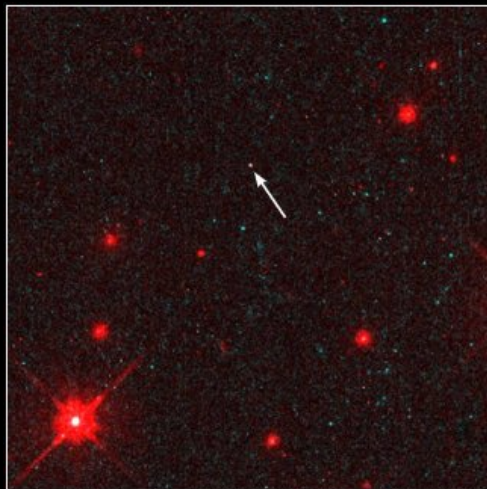
Mgławica Krab, supernowa typu II (1054 r., pulsar obraca się z częstotliwością ok. 30 razy na sekundę).

Supernowe - kosmiczne eksplozje



Oszacowania: 1 SN/100 lat w przeciętnej galaktyce → 30/s w obserwowalnym Wszechświecie!)

Gwiazdy neutronowe



Isolated Neutron Star RX J185635-3754 HST • WFPC2

PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997

F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

Gwiazdy neutronowe

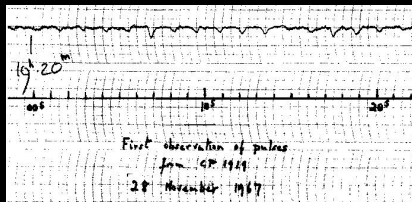
- ★ Masa $M = 1 - 2 M_{\odot}$,
- ★ Promień $R \simeq 10$ km,
- ★ Zwartość $2GM/Rc^2 \simeq 0.3$,
- ★ Ogromne pole magnetyczne,
- ★ Gęstość większa niż materii jądrowej (jedna łyżeczka materii gwiazdy neutronowej waży mniej-więcej tyle, ile wszyscy żyjący obecnie ludzie).



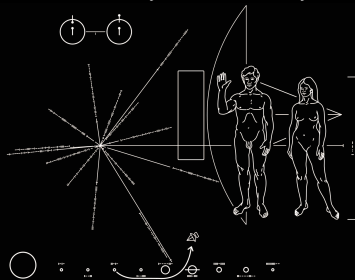
Odkrycie LGM1 (PSR B1919+21)



Jocelyn Bell, odkrywczynie pierwszego pulsara (Cambridge, Jordell Bank 1967).



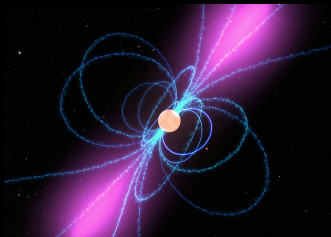
Pierwsze, historyczne obserwacje



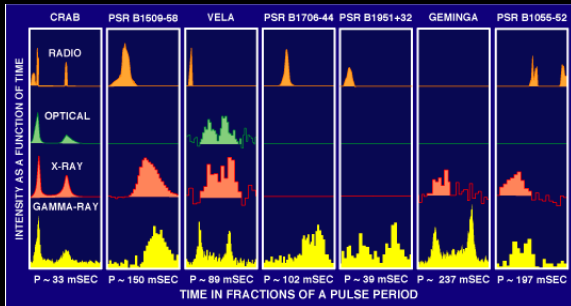
Przesłanie sondy Pioneer z pozycją Układu Słonecznego określoną przy użyciu pobliskich pulsarów.

Model pulsara

Odkrycie bardzo szybkich pulsarów (> 1 Hz) wykluczyło model pulsacji powierzchni i ciasne układy zaćmieniowe.

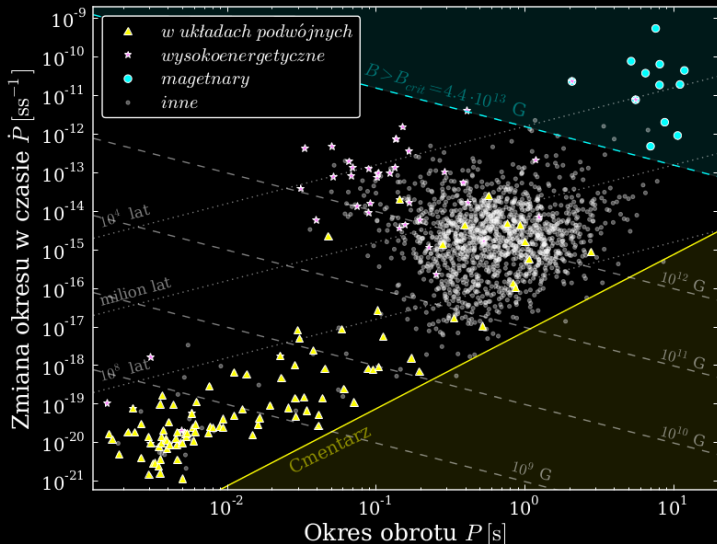


„Latarnia morska” -
promieniowanie pochodzące z
magnetosfery lub powierzchni,
widoczne z częstotliwością rotacji
gwiazdy.



Niektóre pulsary świecą w wielu długościach fal, od radio do X i γ .

Radiopulsary

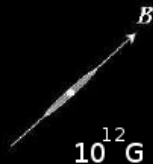
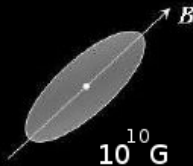


Najstabilniej rotujące gwiazdy neutronowe/pulsary są dokładniejsze od najlepszych zegarów atomowych!

Porównanie pól magnetycznych w przyrodzie

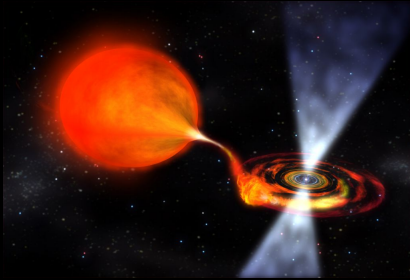
★ Pole magnetyczne Ziemi	0.6 G
★ Magnes żelazny	100 G
★ Stabilne pola magnetyczne w laboratoriach	400,000 G (4×10^5 G)
★ Najsilniejsze pola magnetyczne w laboratoriach	10,000,000 G (10^7 G)
★ Największe pola magnetyczne „zwykłych” gwiazd	1,000,000 G (10^6 G)
★ Pola pulsarów milisekundowych	100,000,000 G (10^8 G)
★ Typowe pola radiopulsarów	1,000,000,000,000 G (10^{12} G)
★ Magnetary	1,000,000,000,000,000 G (10^{15} G)

(1 G = 10^{-4} T)



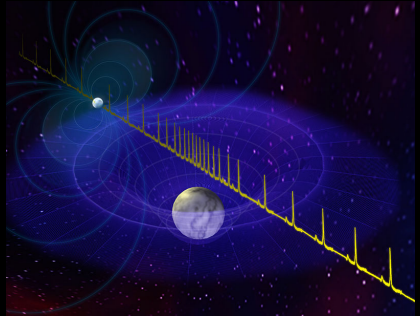
Atom w silnym polu magnetycznym

Układy podwójne & pulsary milisekundowe



Niektóre gwiazdy neutronowe zostają „rozkręcone” przez dyskową akrecję materii z drugiego składnika.

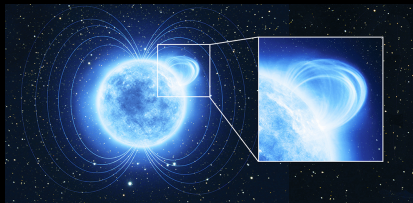
Akrecyjny *recycling* sprawia, że niektóre pulsary obracają się naprawdę szybko - obecny rekord to 716 Hz!



Relatywistyczne układy podwójne, w których oba składniki to gwiazdy neutronowe → Testowanie teorii grawitacji i bardzo dokładne pomiary mas składników.

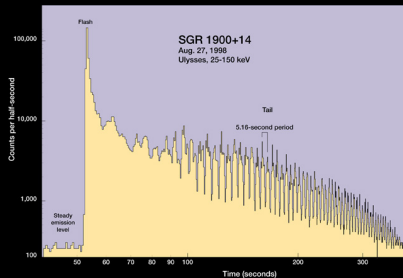
Wpływ OTW na precesję orbity Merkurego: $43''/100 \text{ lat}$,
precesja w układzie PSR J0737-3039:
 $17^\circ/\text{rok}$!

Magnetary



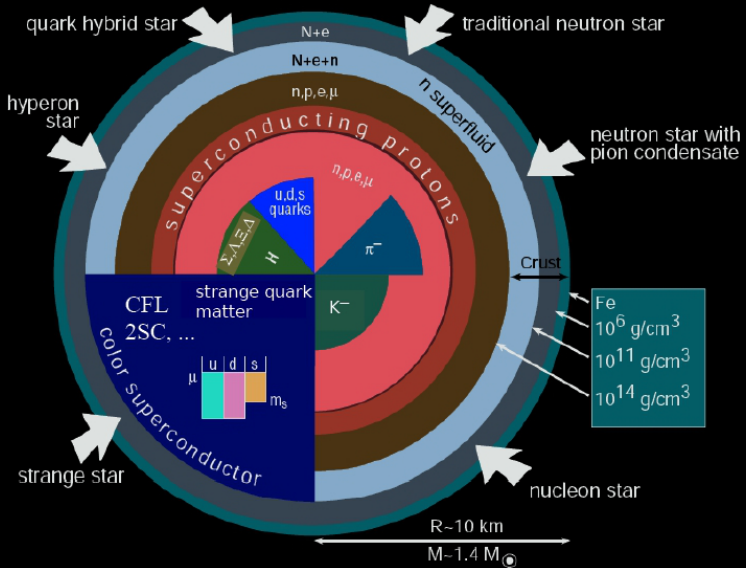
Podklasa powoli obracających się pulsarów, o BARDZO dużym polu magnetycznym.

- ★ Jak stabilne jest takie pole?
- ★ Jak zostało stworzone?



Niektóre z nich, SGRy (Soft Gamma-ray Repeaters) wybuchają od czasu do czasu (źródło energii: pole magnetyczne)

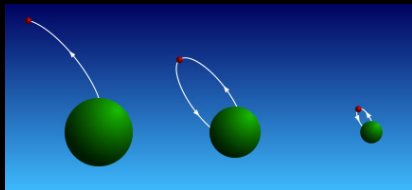
Co wiemy o wnętrzach gwiazd neutronowych?



Czarne dziury



Czarna dziura: horyzont



Prędkość ucieczki z obiektu o masie M i promieniu R - druga prędkość kosmiczna:

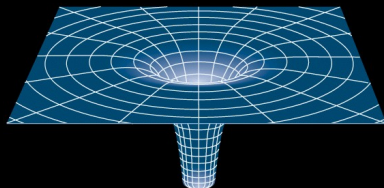
$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{R} = 0,$$
$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = c \sqrt{\frac{2GM}{c^2} \frac{1}{R}} = c \sqrt{\frac{R_s}{R}}$$

Promień Schwarzschilda:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \simeq 3 M/M_\odot \text{ km}$$

Rozwiązanie K. Schwarzschilda
(1916):

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

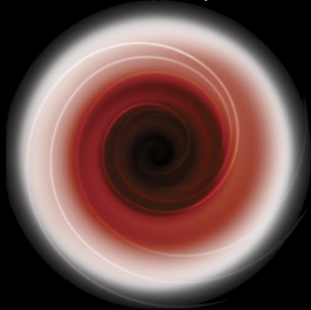


Horyzont jest sferą otaczającą centralną osobliwość czarnej dziury. Żaden obiekt - nawet foton - nie jest w stanie wydostać się spod horyzontu ($v > c$)

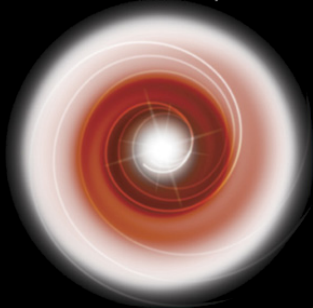
Newton: energia fotonu ($E = h\nu$) wydostającego się ze studni potencjału grawitacyjnego maleje (kolor światła przesuwają się ku czerwieni).

Horyzont a powierzchnia

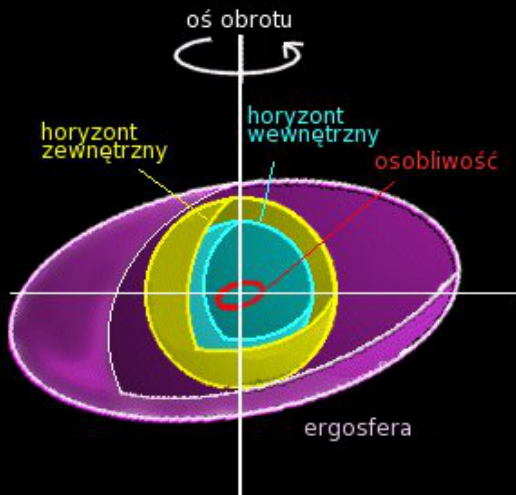
Black Hole X-ray Nova



Neutron Star X-ray Nova



Rotująca czarna dziura - rozwiązanie R. Kerra (1963)

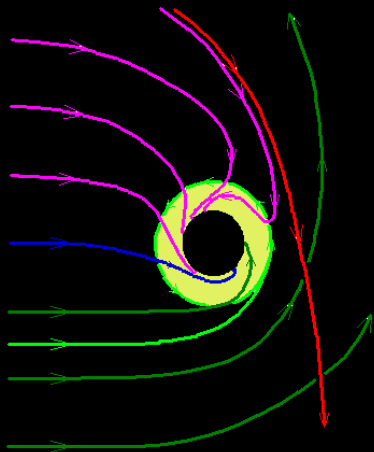
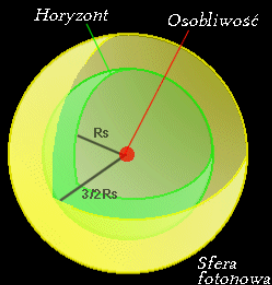


Astrofizyczna czarna dziura jest prostsza niż cząstka elementarna - do jej opisu wystarczą dwa parametry: masa M , i to jak szybko się obraca (moment pędu) J .

Orbity wokół czarnej dziury

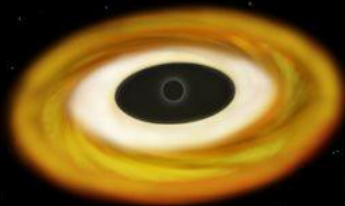
Według teorii grawitacji Einsteina masy zakrzywiają przestrzeń wokół siebie - ma to wpływ na ruch materii wokół masywnego ciała. Dla nierotującej czarnej dziury:

- ★ Ostatnia stabilna orbita kołowa $r = 3R_s$,
- ★ Orbita fotonowa $r = \frac{3}{2}R_s$ - światło złapane przez czarną dziurę krąży po kołowej orbicie!



W przypadku rotującej czarnej dziury, przestrzeń wlecze cząstki (i fotony) za sobą.

Jak sprawdzić, czy czarna dziura wiruje?



Nierotująca czarna dziura

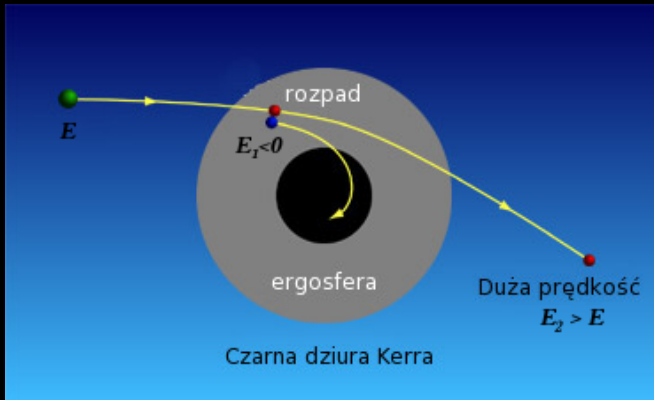


rotująca czarna dziura

Model rotującej czarnej dziury Kerra przewiduje, że horyzont jest mniejszy - dysk akrecyjny może znaleźć się bliżej centrum i świeci w twardszym promieniowaniu niż w modelu Schwarzschilda.

Rotująca czarna dziura: ergosfera

Ponad horyzontem znajduje się obszar, w którym czasoprzestrzeń jest „wleczone” w kierunku rotacji dziury (nie istnieją stacjonarne układy odniesienia).

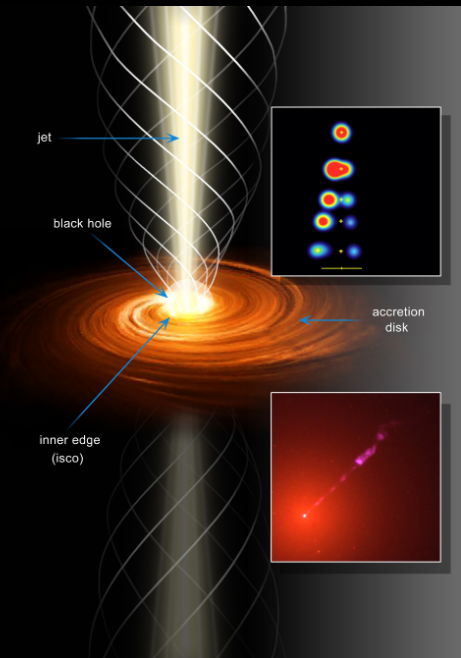


Mechanizm R. Penrose'a: metoda wydobywania energii z czarnej dziury (zamiana energii rotacji czarnej dziury na energię cząstek; *ergon*=praca)

Dżet

Relatywistyczny wypływ materii i promieniowania, prędkość bliska prędkości światła.

(radiowe obserwacje mikrokwazara GRS 1915+105, i optyczne obserwacje kwazara M87)



Silhouette czarnej dziury



(Interstellar 2014)

Silhouette czarnej dziury

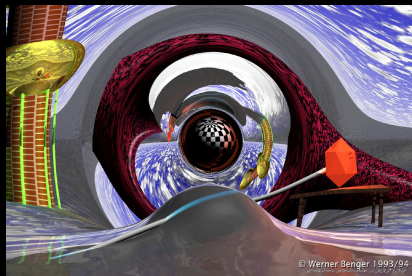
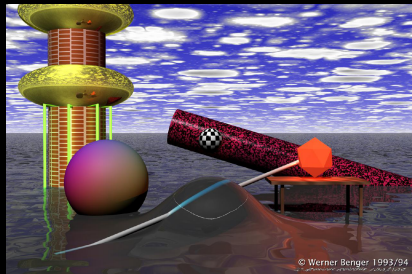


(Interstellar 2014)

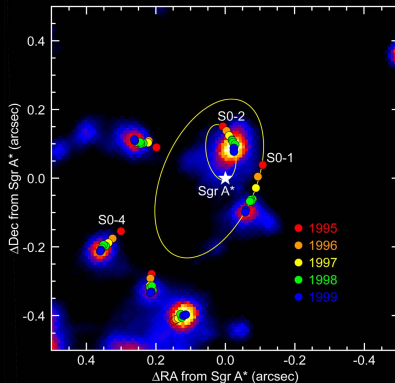
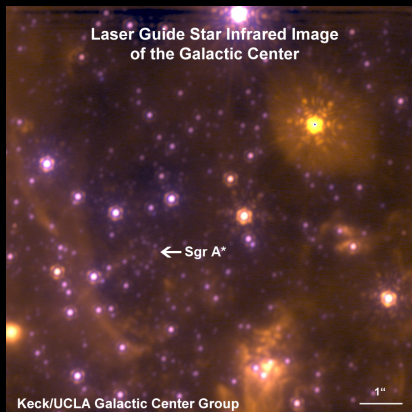
Silhouette czarnej dziury



Pierwsza realistyczna symulacja dysku akrecyjnego (Jean-Alain Marck, 1991)



Centralna czarna dziura w naszej Galaktyce



Analiza ruchu pobliskich gwiazd umożliwia wyznaczenie masy centralnego, niewidocznego obiektu: czarna dziura Sgr A* waży 4 miliony M_{\odot} .

Bezpośrednie badania grawitacji

「著作権保護コンテンツ」

重力理論

Gravitation — 古典力学から相対性理論まで、
時空の幾何学から宇宙の構造へ

若野 省己 [訳]

GRAVITATION

Charles W. MISNER

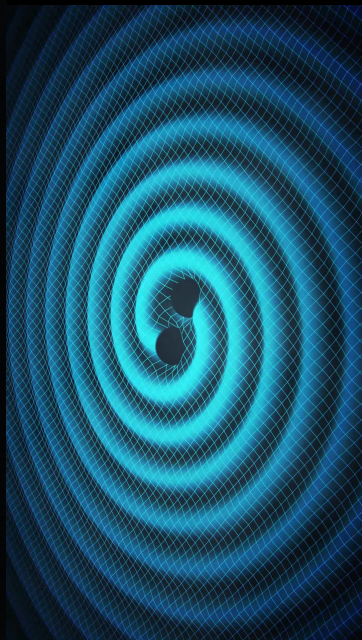
Kip S. THORNE

John Archibald WHEELER



丸善出版

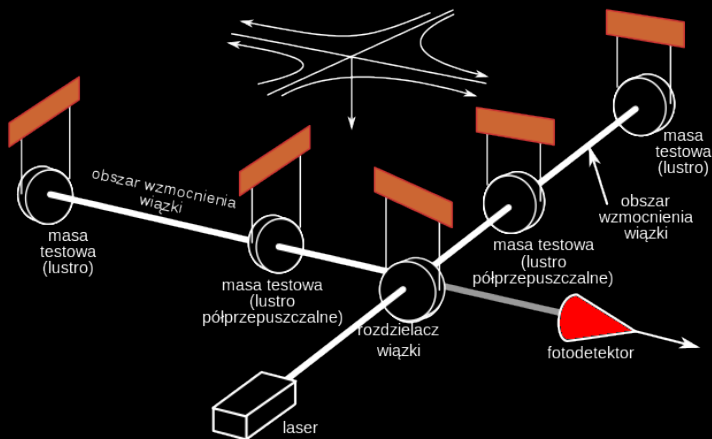
「著作権保護コンテンツ」



Detekcja fal grawitacyjnych przy użyciu interferometrów typu Michelsona-Morleya

„Odształcenie” czasoprzestrzeni powodowane przez astrofizyczną falę grawitacyjną: $h = \Delta l / l \ll 10^{-18}$,

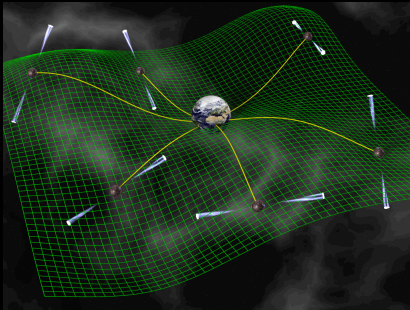
mierzone za pomocą rejestracji zmiany długości ramion interferometru → zmian obrazu interferometrycznego (Δl , zmiana długości ramienia jest o wiele mniejsza od rozmiaru protonu!)



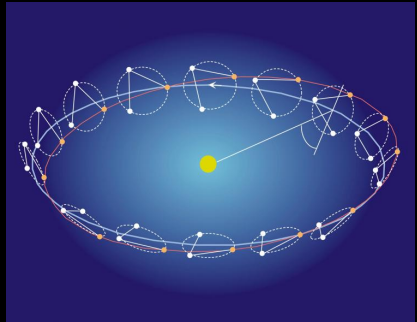


Europejski interferometr Virgo (długość ramion - 3km)

PTA & eLISA

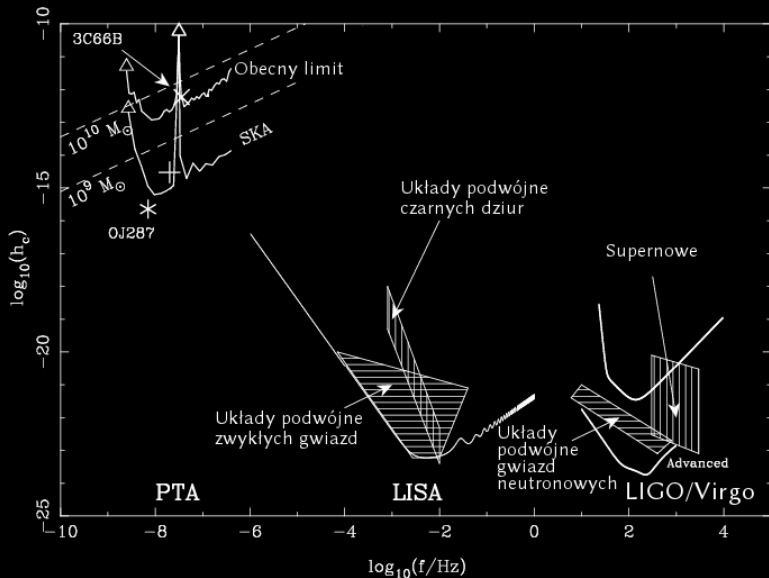


PTA (Pulsar Timing Array) - pomysł obserwacji stabilnych pulsacji wielu pulsarów (Ziemia z radioteleskopami-detektorami jako masa testowa).

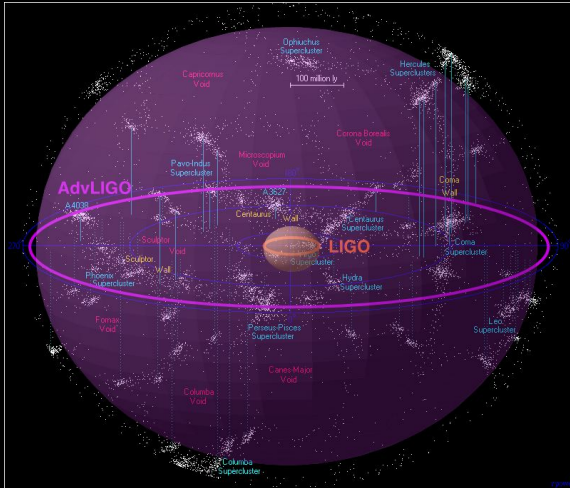


eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna) - kosmiczny interferometr o ramionach długości 1 mln km, na orbicie wokół Słońca.

Astrofizyczne źródła sygnału

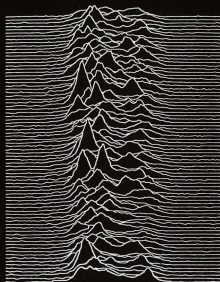


Badania interferometryczne w tzw. *Advanced Era*: 2015 - ...



Czułość aLIGO i aVirgo lepsza o rząd wielkości → zasięg 10 razy większy (20 Mpc → 200 Mpc)

Czułość $\propto 1/r$ - detekcja amplitudy, a nie energii fal!



Pulsy PSR B1919+21/LGM1

(na okładce płyty Joy Division "Unknown pleasures")