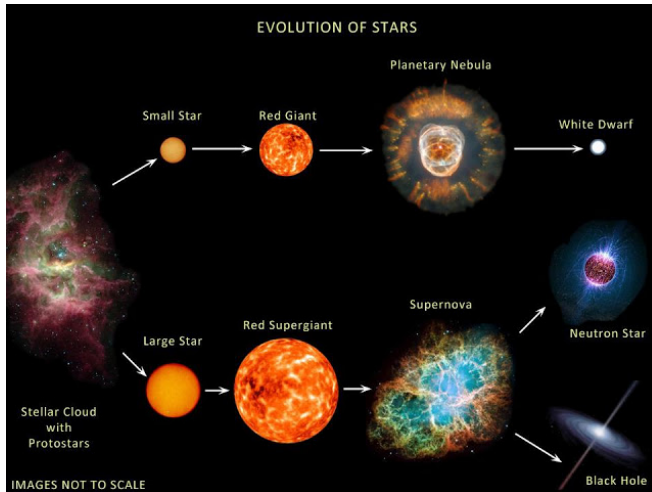


Kosmiczni degeneraci

Białe karły, gwiazdy neutronowe i czarne dziury

Michał Bejger

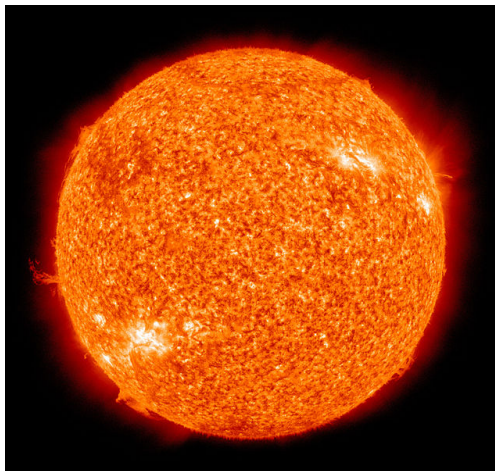
Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika PAN



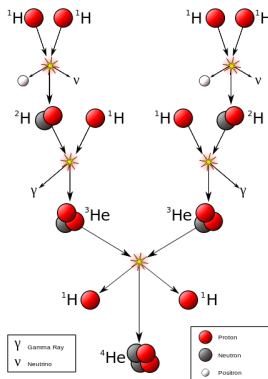
Życie gwiazd

Co to jest gwiazda?

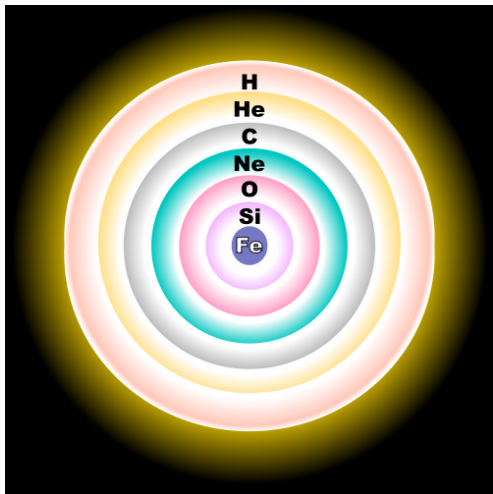
„Gwiazda to kuliste ciało niebieskie stanowiące skupisko powiązanej **gravitacyjnie** materii, które (przynajmniej przez część swojego życia) **emituje** powstającą w wyniku procesów **syntezy jądrowej** energii”



Słońce



Nasz związek ze Wszechświatem



Kolejne etapy „palenia” pierwiastków w wnętrzach gwiazd

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



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

Diagram HR, od narodzin do śmierci

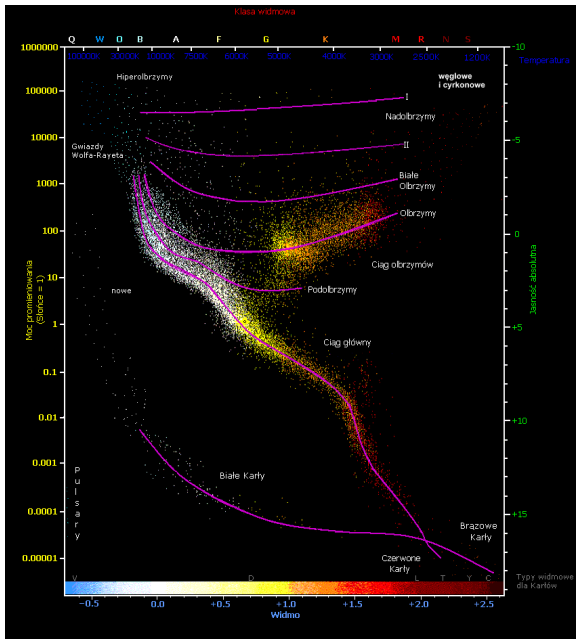
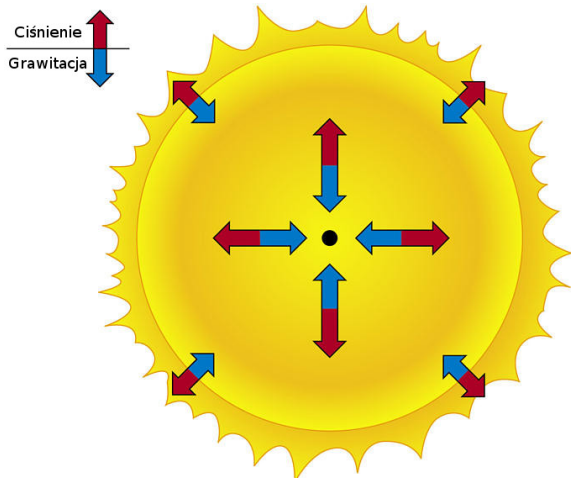


Diagram Hertzsprunga-Russella przedstawia zależność kolor (temperatura) - jasność dla gwiazd o różnych masach (1910).



Ejnar Hertzsprung & Henry Norris Russell

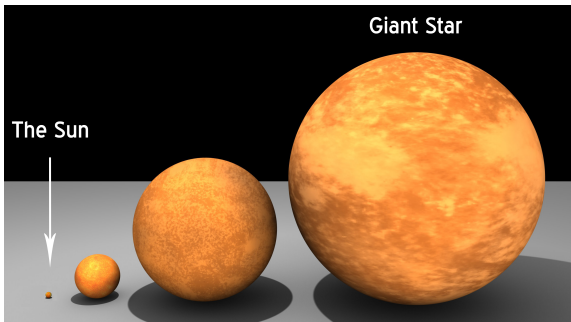
Równowaga hydrostatyczna



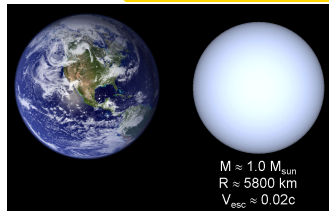
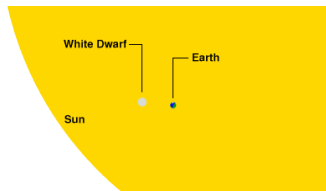
Równanie równowagi między ciśnieniem, a grawitacją:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}$$

Gwiazdy - masy i rozmiary

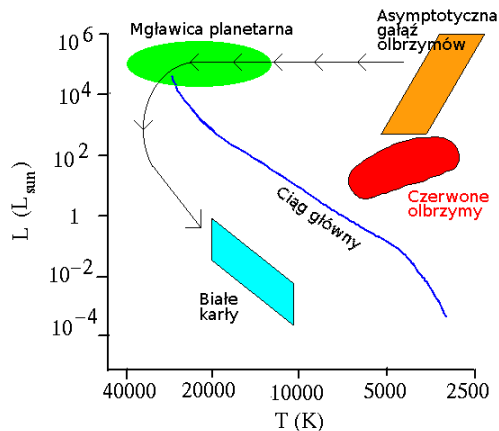


Masy gwiazd (zależne od wielu czynników):
 $150 - 0.1 M_{\odot}$



Białe karty

Ewolucja białych karłów



Gwiazda o masie $< 8 M_{\odot}$ na Ciągu Głównym, przechodzi przez fazę mgławicy planetarnej i staje się białym karłem.

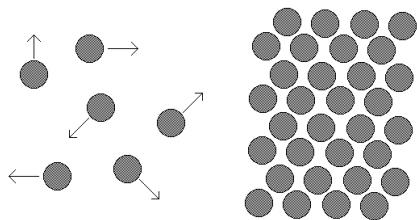
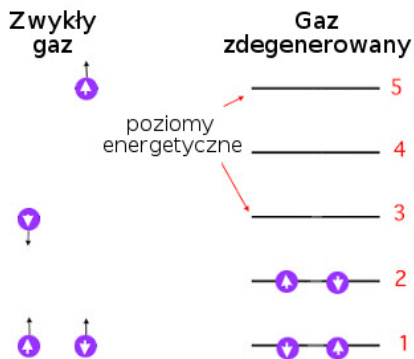
Mgławice planetarne



Odrzucona otoczka oświetlana przez pozostałego wewnątrz białego karła



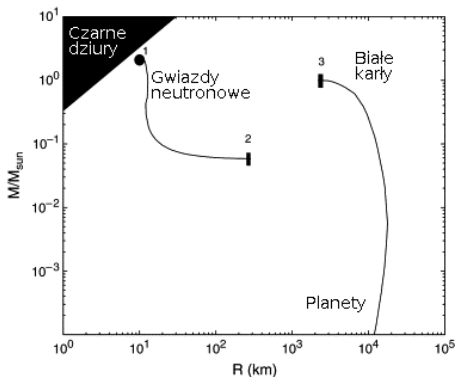
Degeneracja



Ciśnienie w zwykłym gazie pochodzi z ruchu cząstek. W gazie zdegenerowanym poziomy energetyczne są obsadzone od najniższego (**zasada Pauliego**), a zmiany temperatury gazu nie wpływają na ciśnienie.

Masa maksymalna

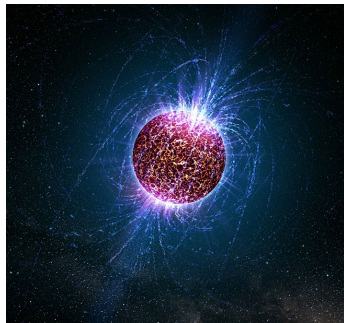
Maksymalna masa białych karłów:
 $\approx 1.4 M_{\odot}$ (masa Chandrasekhara)



Gwiazdy neutronowe

Co to jest gwiazda neutronowa?

To obiekt, którego jedna łyżeczka
materii waży tyle ile wszyscy ludzie
na Ziemi!



Gwiazda neutronowa: rzędy wielkości

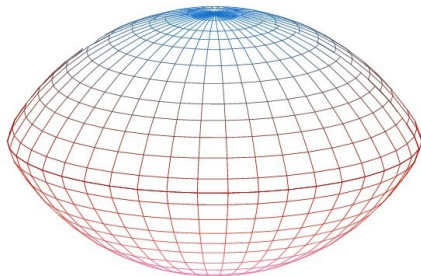
- Masa:
~1.5 masy Słońca
- Promień:
~10 km
- Zwartość:
 $R_g/R \sim 0.3$



Gwiazda neutronowa: rzędy wielkości

- **Grawitacja na powierzchni** ~100 miliardów razy większa od ziemskiej
- **Średnia gęstość** ~100 milionów ton na cm^3
- **Ciśnienie centralne** ~ 10^{30} atmosfer
- **Rotacja** do 700 obrotów na sekundę, tzn. prędkość na równiku ~ $0.1c$

Gigantyczne “jądro atomowe”
składające się z
ok. 10^{57} nukleonów?



Odkrycie PSR B1919+21, okres 1.337 s

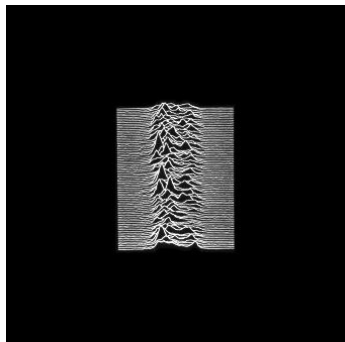


*Jocelyn Bell, w tle teleskop
w Cambridge*

Jocelyn Bell: przypadkowo, podczas poszukiwania kwazarów w 1967 r. (w 1974 r. Anthony Hewish dostaje nagrodę Nobla)

Regularne pulsy początkowo brano za sygnał satelity szpiegowskiego a nawet pozaziemskiej cywilizacji :-)

(B1919+21 = LGM1)



Joy Division "Unknown pleasures"

Supergęsta materia jądrowa

Skład materii – duża liczba neutronów (liczba protonów równoważona liczbą elektronów) Zakaz Pauliego – dwa fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie energetycznym



Każdy dodatkowy fermion powoduje zwiększenie energii



równowaga to minimum energii

Korzystne zachodzenie reakcji:

$p + e$



$n + \nu$

neutronizacja materii

skorupa

10^4

neutronizacja
materii

10^7

punkt wypływu
neutronów

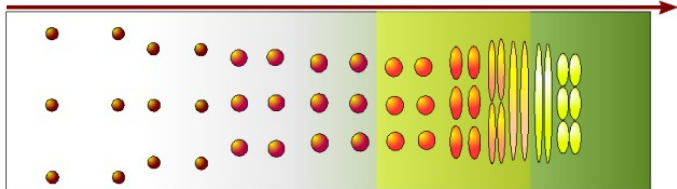
10^{11}

"śmieszne
fazy"

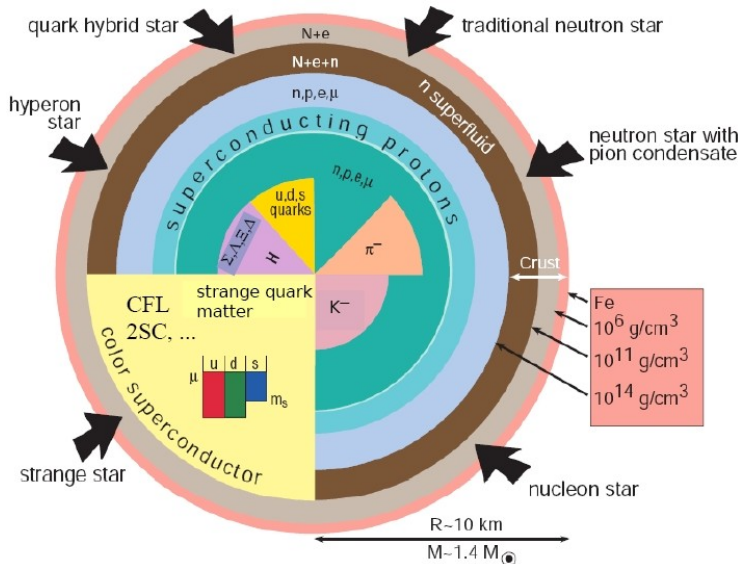
10^{14}

jednorodna
materia

gęstość (g/cm^3)

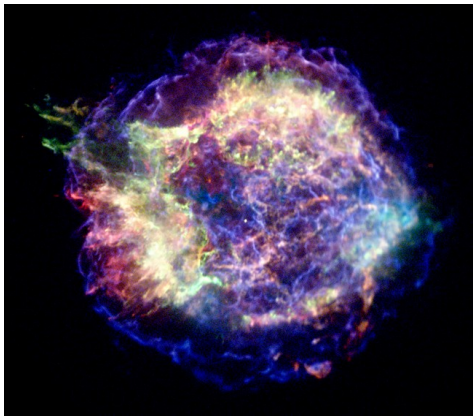


Wnętrze gwiazdy neutronowej



Skąd się biorą?

Zapadnięcie się masywnej gwiazdy ($M > 8$ mas Słońca), w wyniku niestabilności jej żelazno-niklowego jądra: **wybuch supernowej**



Pozostałość po supernowej Cas A



Fala uderzeniowa wokół pulsara PSR J0437-4715

Czarne dziury

Czarna dziura: co to jest?



Rozwiązanie sferycznie symetryczne (statyczne, Karl Schwarzschild 1916)

Metryka:

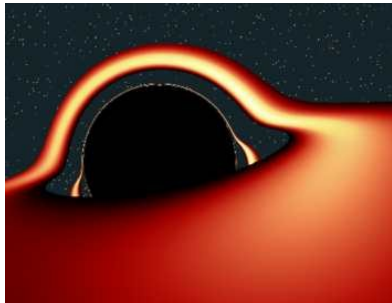
$$ds^2 = c^2 dt^2 \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) - \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Promień grawitacyjny:

$$r_g = 2GM/c^2 \approx 2.95 M/M_\odot \text{ km}$$

(Dla przykładu: promień grawitacyjny Ziemi $\sim 1\text{cm}$)

W przypadku czarnej dziury Schwarzschilda
w odległości $r=r_g$ od środka znajduje się
horyzont



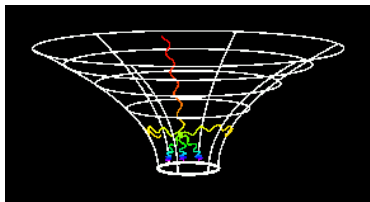
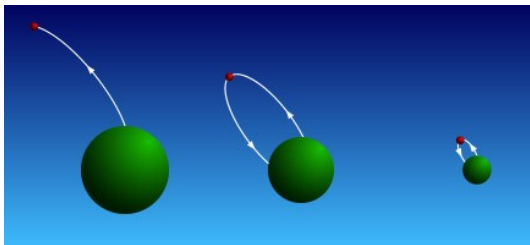
Czarna dziura: horyzont

Dla cząstek pod horyzontem,
druga prędkość kosmiczna
(prędkość ucieczki) $> c$

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r} = 0$$

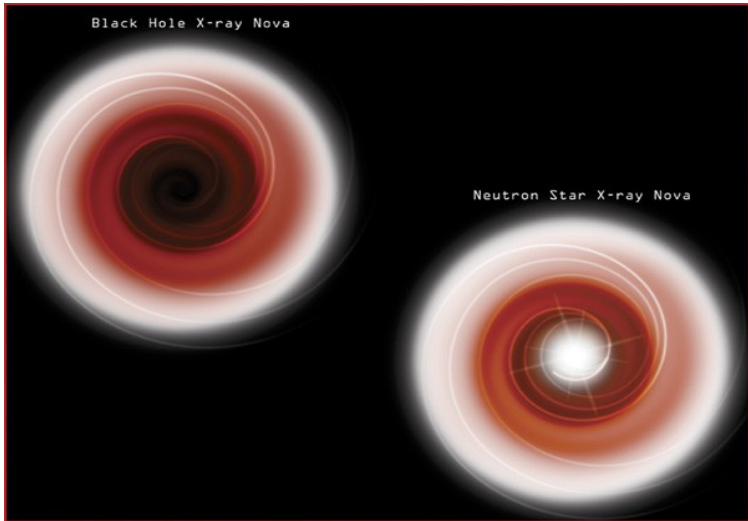
$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = c\sqrt{\frac{2GM}{c^2} \frac{1}{r}} = c\sqrt{\frac{r_g}{r}}$$

$$r_g = 2GM/c^2 \approx 2.95 M/M_\odot \text{ km}$$

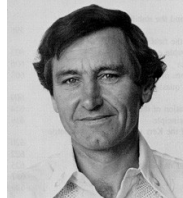


Horyzont jest powierzchnią otaczającą centralną osobliwość czarnej dziury. Żaden obiekt, nawet foton nie jest w stanie wydostać się spod horyzontu

Horyzont a powierzchnia



Rozwiązanie Kerra

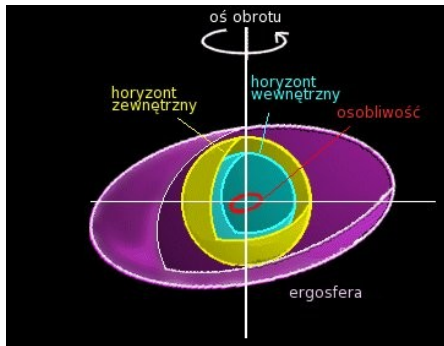


Rozwiązanie osiowo-symetryczne (rotująca czarna dziura, Roy Kerr 1963):

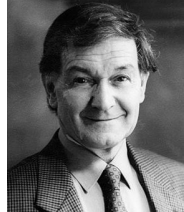
$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g r}{\rho^2}\right) c^2 dt^2 + \frac{2r_g c r a \sin^2 \theta}{\rho^2} dt d\phi - \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 - \rho^2 d\theta^2 - \left[(r^2 + a^2) \sin^2 \theta + \frac{r_g r a^2 \sin^2 \theta}{\rho^2} \right] d\phi^2$$

$$\begin{aligned} \rho^2 &\equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta \\ \text{gdzie } \Delta &\equiv r^2 + a^2 - r_g r \\ a &= J/Mc \end{aligned}$$

**Czarna dziura opisana przez
dwa parametry:
masę M oraz moment pędu J**

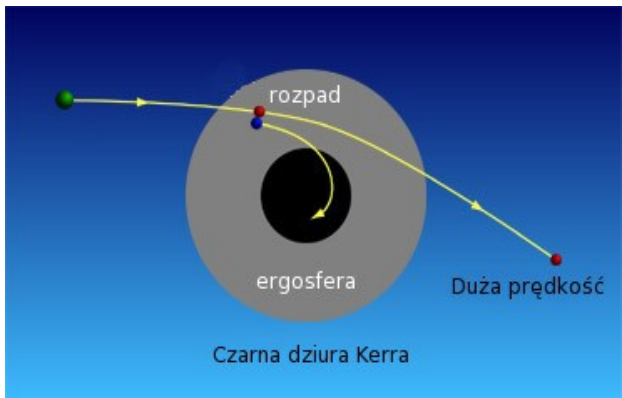


Rotująca czarna dziura: ergosfera

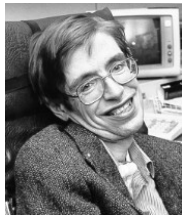


Mechanizm Penrose'a:

metoda wydobywania energii
z czarnej dziury
(zamienianie energii
rotacji czarnej dziury na
energie cząstek)



Promieniowanie Hawkinga



Czy czarne dziury są wieczne?

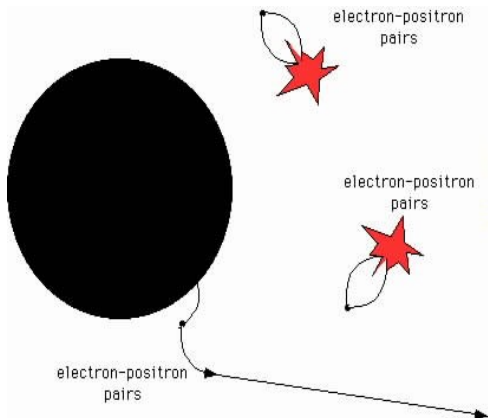
Wg klasycznej OTW tak.

Efekt kwantowy, dziura promieniuje jak ciało doskonale czarne o temperaturze odwrotnie proporcjonalnej do masy

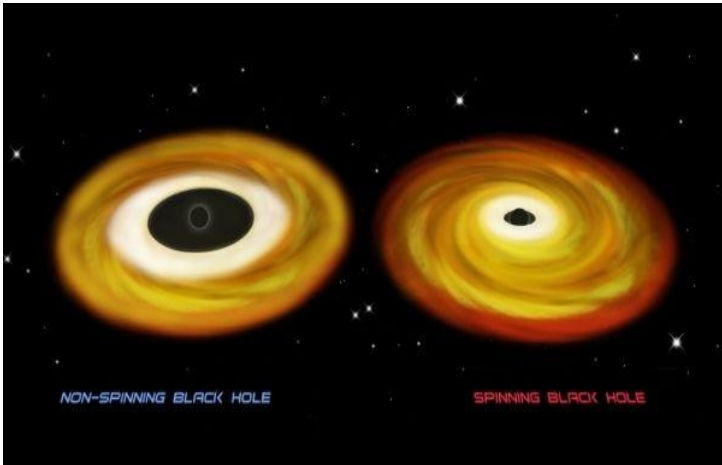
$$T \sim 10^{-8} M_{\odot}/M \text{ K}$$

Bekenstein: prawa opisujące stan czarnych dziur, analogiczne do praw termodynamiki

Entropia = powierzchnia czarnej dziury

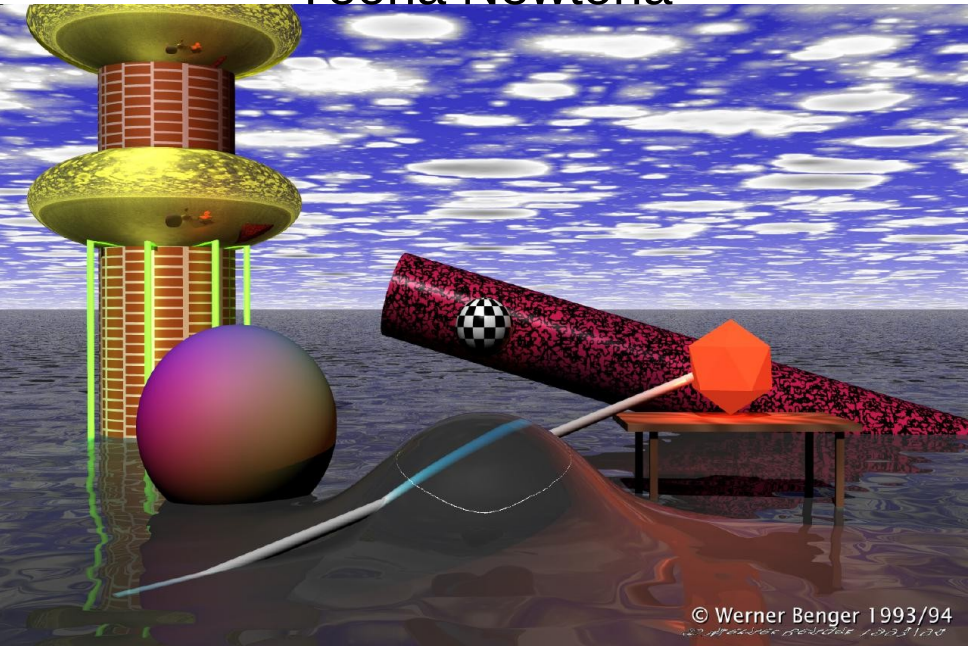


Schwarzschild vs Kerr



Rotująca czarna dziura jest mniejsza od statycznej!

Teoria Newtona



Teoria Einsteina

