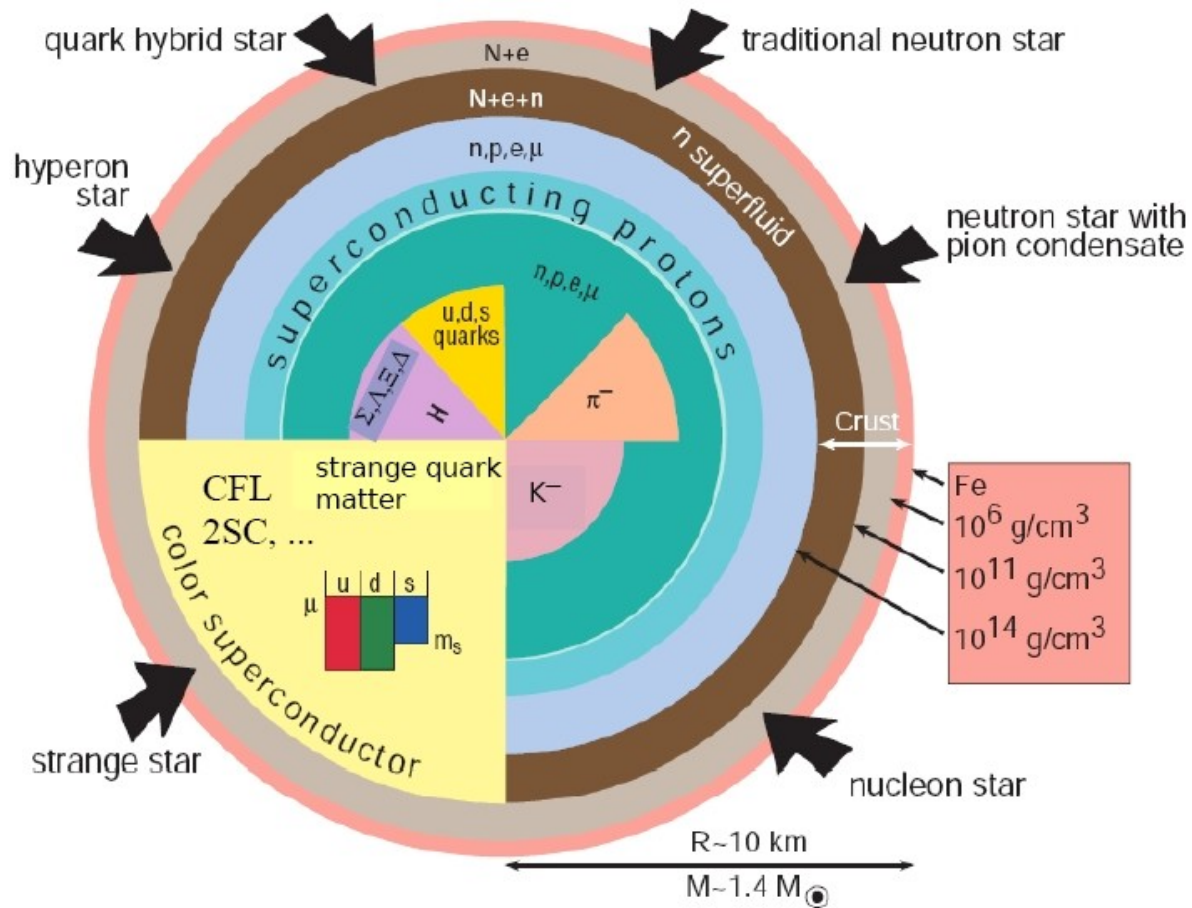
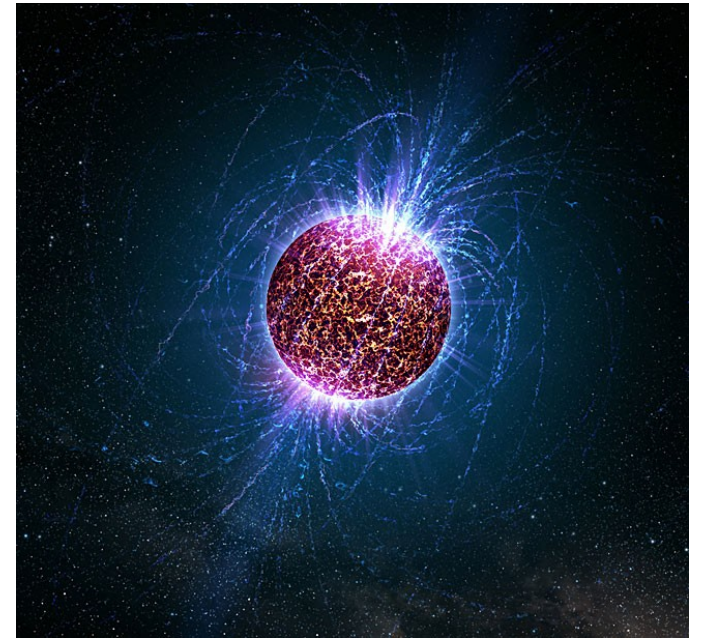


Gwiazdy neutronowe



Co to jest gwiazda neutronowa?

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



Gwiazda neutronowa: rzędy wielkości

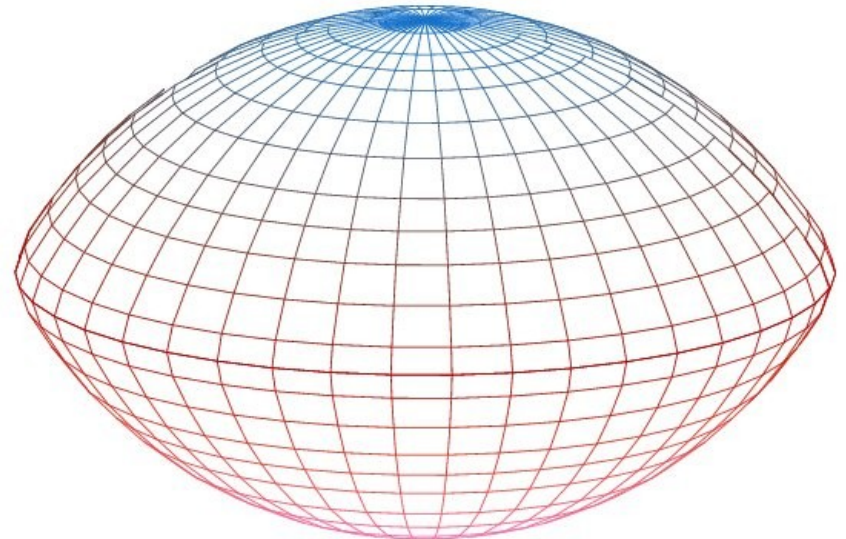
- Masa:
~1.5 masy Słońca
- Promień:
~10 km
- Zwartość:
 $R_g/R \sim 0.3$



Gwiazda neutronowa: rzędy wielkości

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

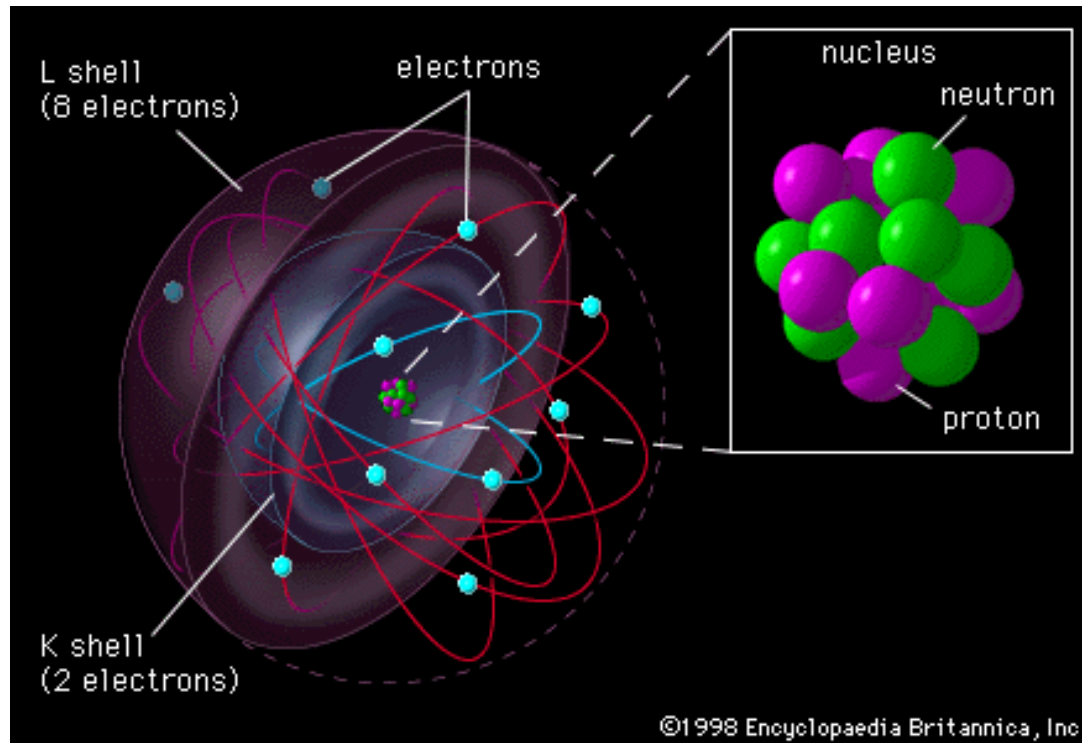
Gigantyczne “jądro atomowe”
składające się z
ok. 10^{57} nukleonów?



Materia ziemska

Atomy – rozmiar atomu 10^{-10} m = 1mm/10mln

- Jądro atomowe – rozmiar ok. 1 fm (10^{-15} m)
- Elektrony – „daleko” od jądra

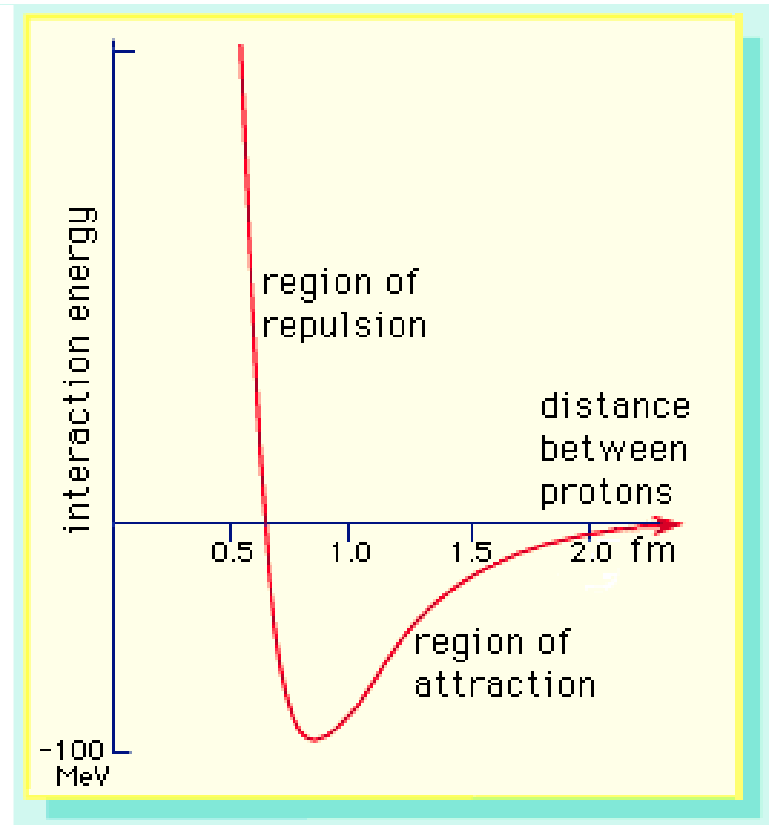


Własności materii jądrowej

Siły elektromagnetyczne – odpychanie się protonów

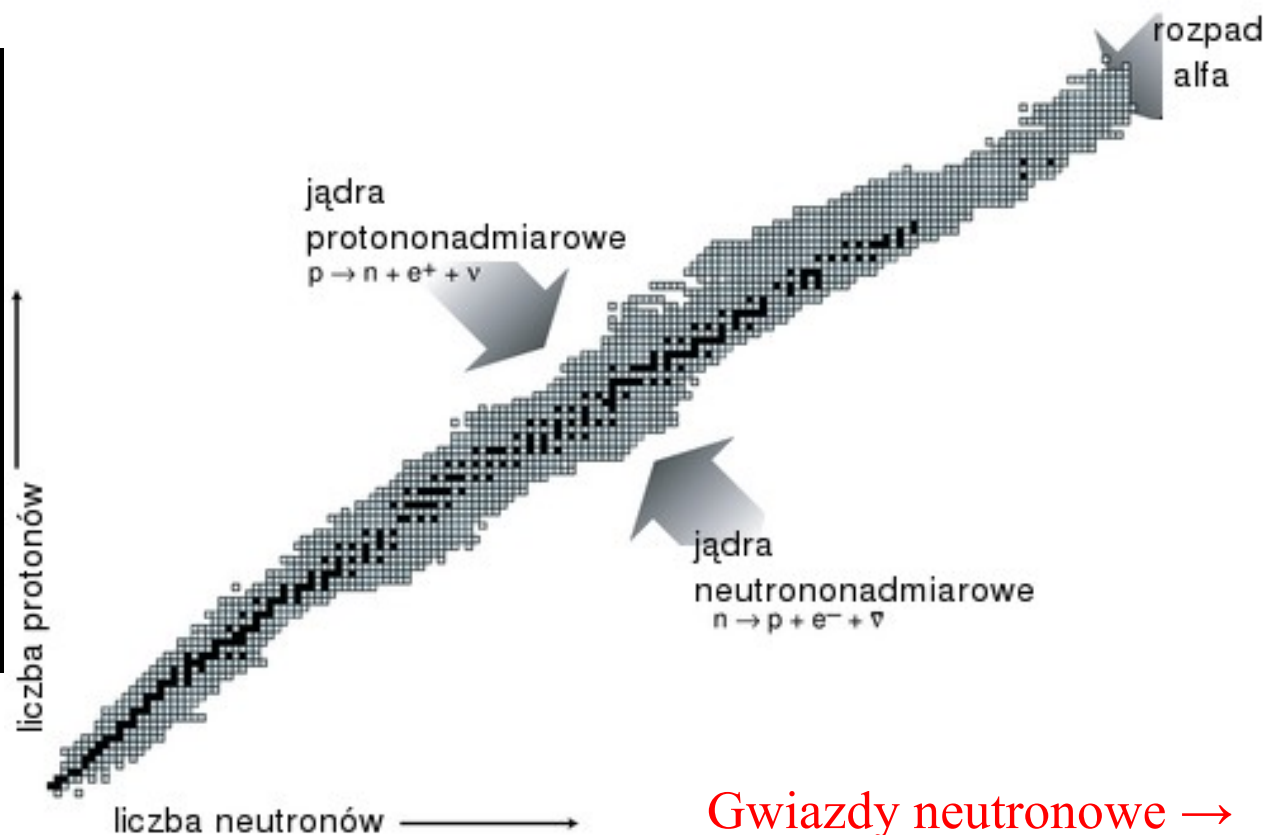
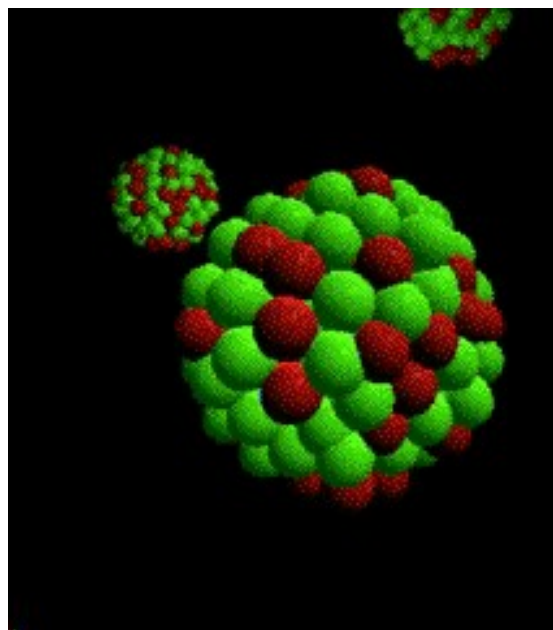
Siły jądrowe:

- przyciągające dla większych odległości
- odpychające dla mniejszych
- energia symetrii – neutron z protonem bardziej się przyciągają niż neutron z neutronem



Stabilność jąder

- Jądra stabilne mają zbliżone liczby neutronów i protonów
- Zachwianie tej równowagi prowadzi do rozpadu jąder



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

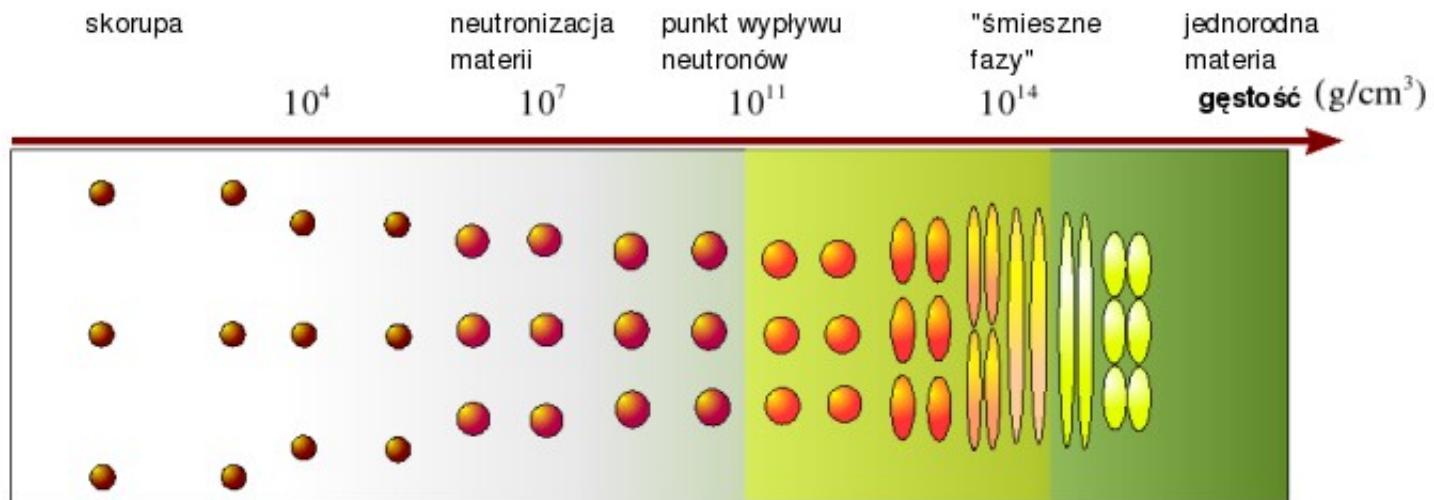


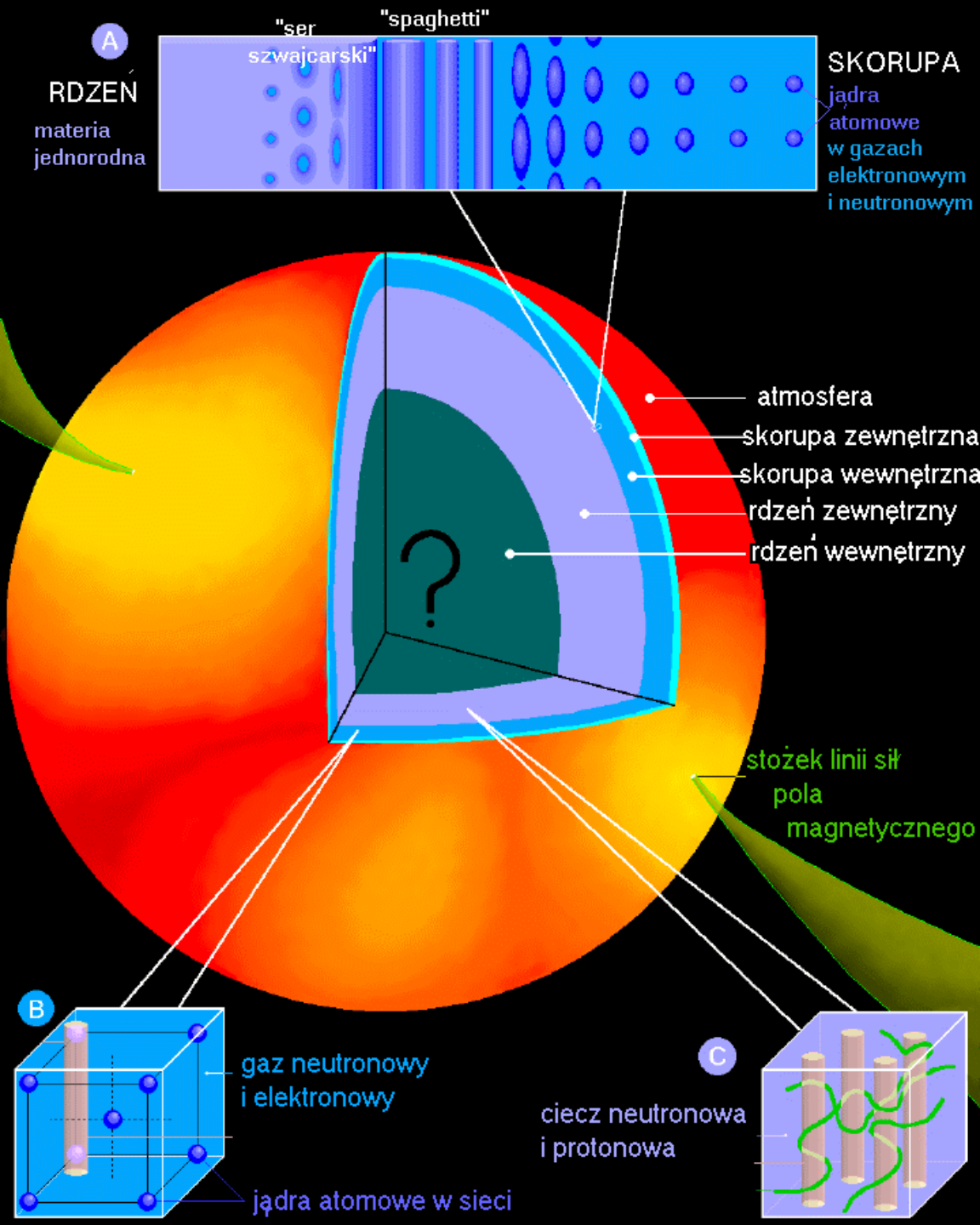
równowaga to minimum energii

Korzystne zachodzenie reakcji:



neutronizacja materii



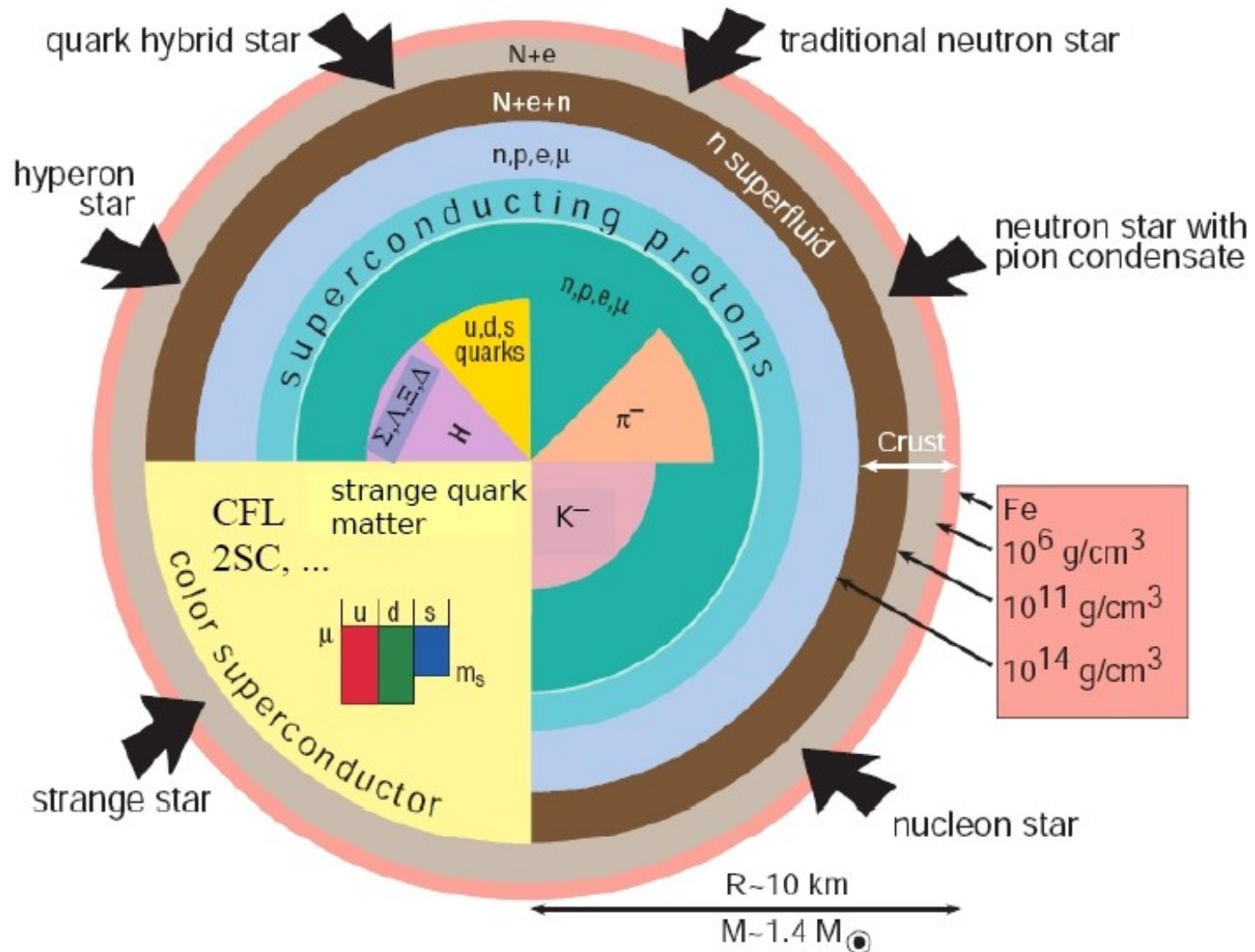


Wewnątrz gwiazdy neutronowej

powyżej gęstości jądrowej: skład materii jest wciąż zagadką!

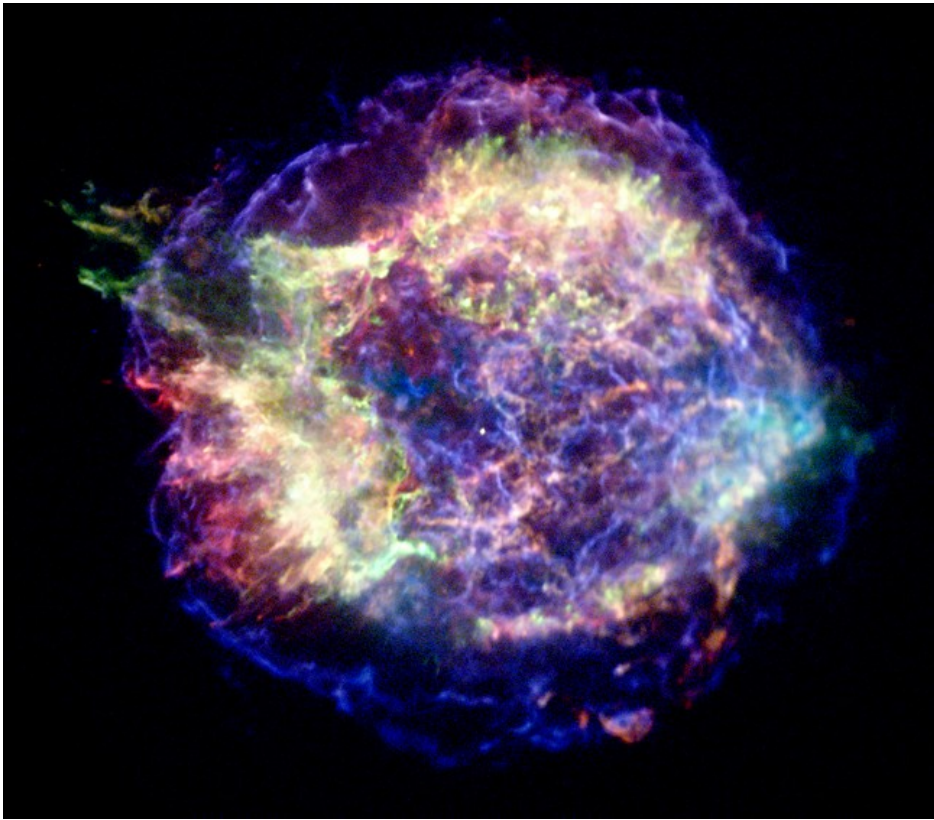
(cząstki dziwne, swobodne kwarki, egzotyczne stany np. kondensaty bozonów...)

Wnętrze gwiazdy neutronowej

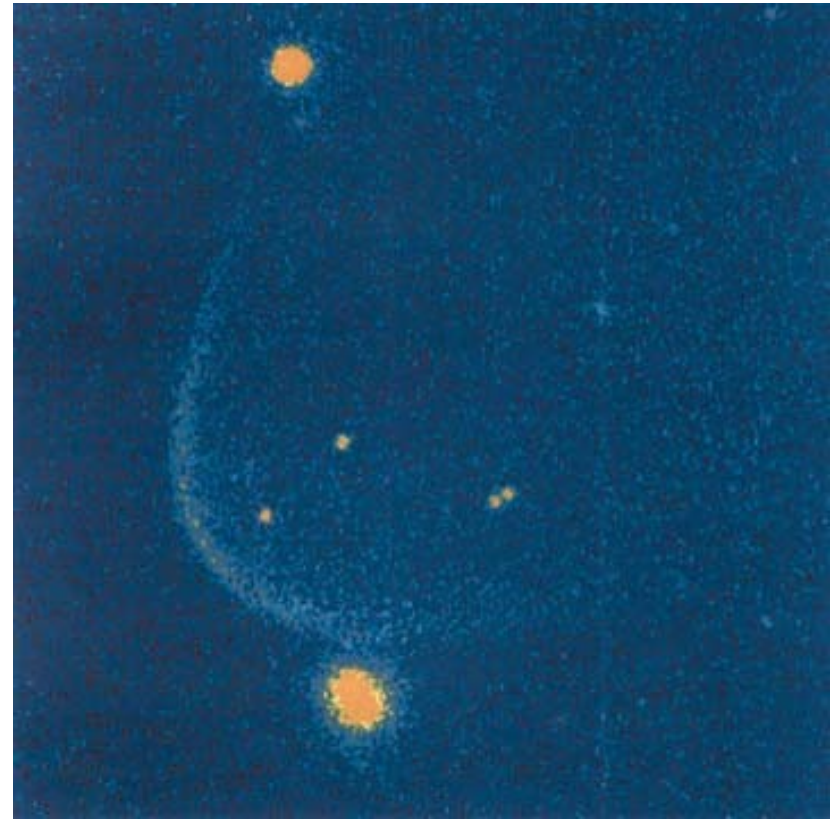


Skąd się biorą?

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

Odkrycie PSR B1919+21, okres 1.337 s

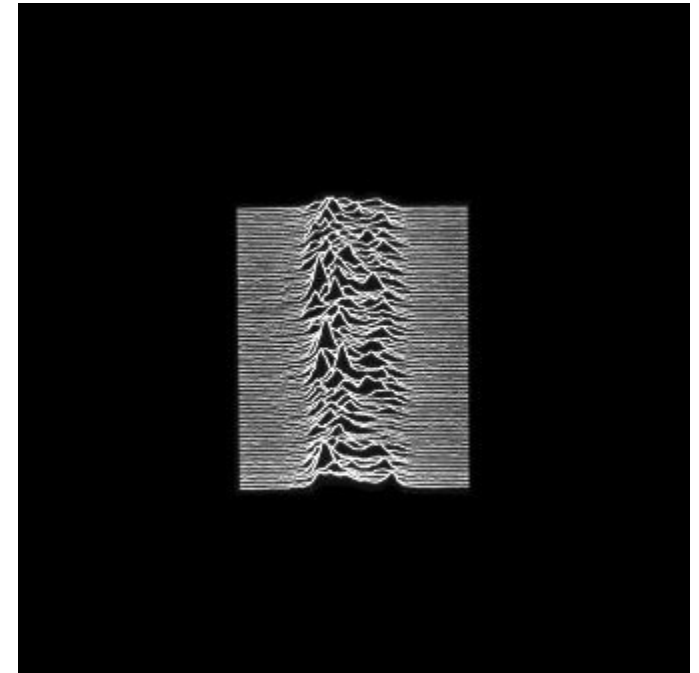


*Jocelyn Bell, w tle teleskop
w Cambridge*

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

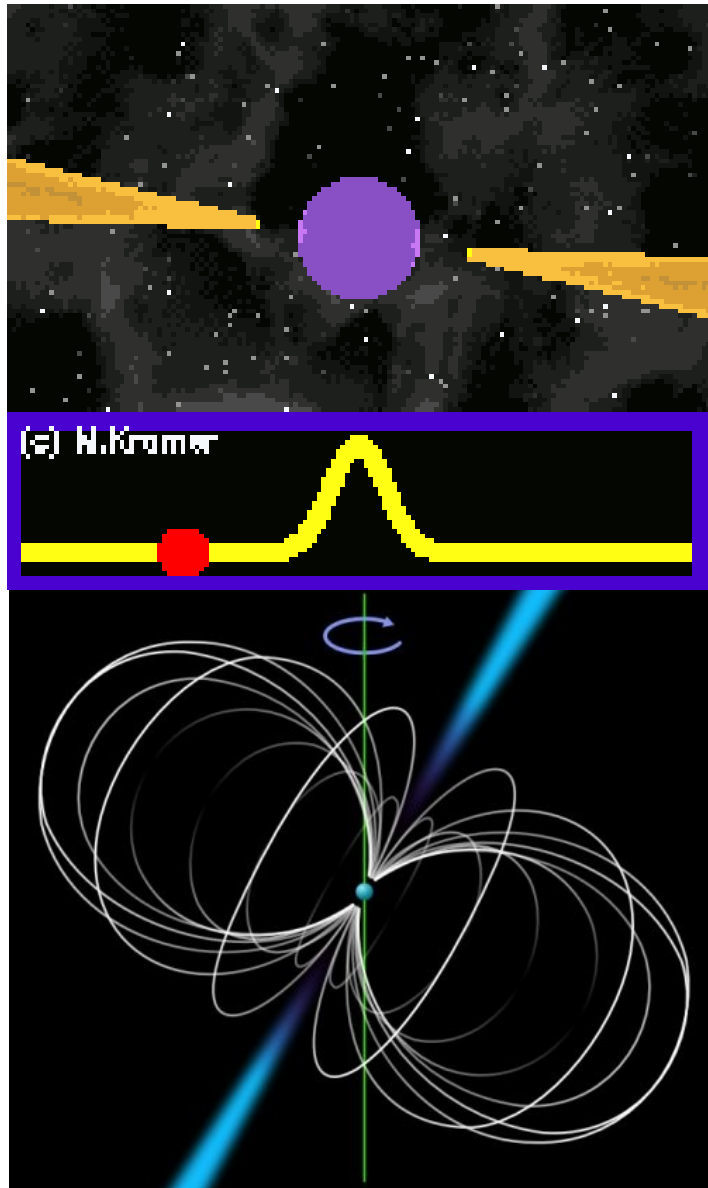
Regularne pulsy początkowo brano za sygnał satelity szpiegowskiego a nawet pozaziemskiej cywilizacji :-)

(B1919+21 = LGM1)



Joy Division "Unknown pleasures"

Co odpowiada za pulsacje?



Początkowo proponowano różne teorie:
układ podwójny, drgania powierzchni gwiazdy...

Rotacja **zwartej** gwiazdy
z silnym polem magnetycznym:
model “latarni morskiej” świecącej w praktycznie
każdej długości fali

Przenika atmosferę
ziemską?

tak nie tak nie

Typ
promieniowania
Długość fali (m)

radiowe mikrofałe podczerwień światło widzialne ultrafiolet rentgenowskie gamma

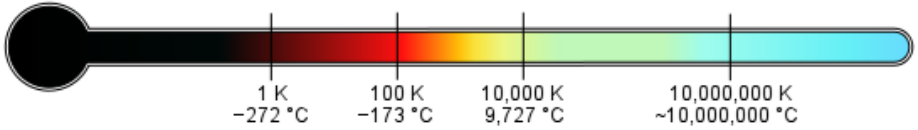
Ciało o skali
zbliżonej
do długości fali



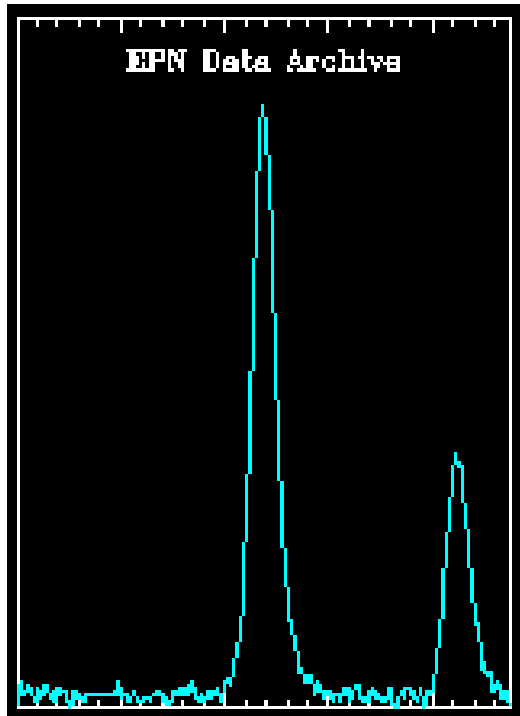
Częstotliwość (Hz)



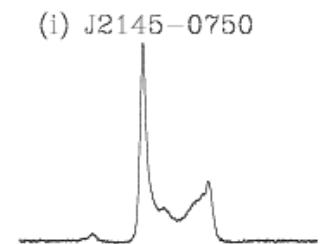
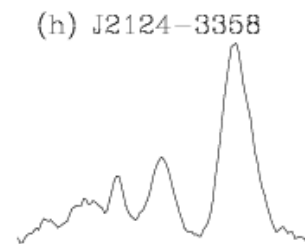
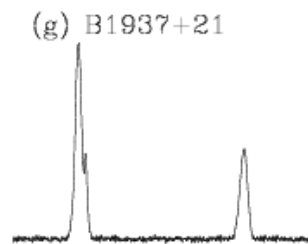
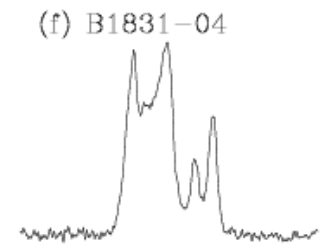
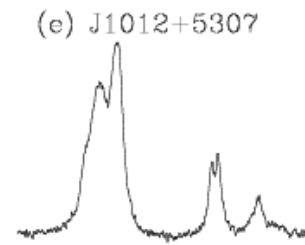
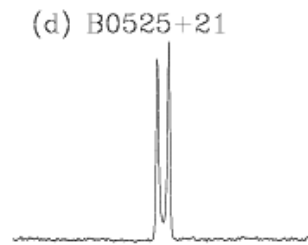
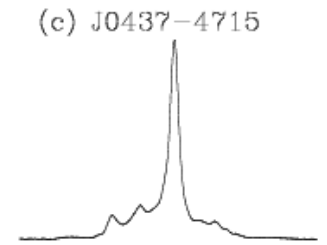
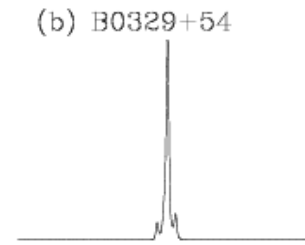
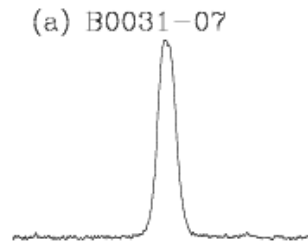
Temperatura
ciała, którego
maksimum
promieniowania
jest w danej
długości fali



Radiowe obserwacje pulsacji



PSR B1937+21:
uśredniony profil pulsu
pierwszego milisekundowego
pulsara (641Hz)



PSR B1937+21



PSR B0329+54
(0.714 sek.)



Pola magnetyczne w przyrodzie

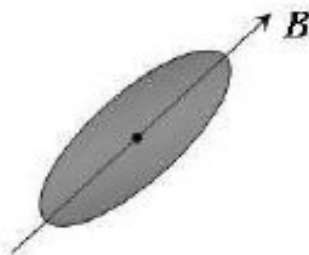
| | |
|---|-----------------------|
| Pole magnetyczne Ziemi | 0.6 G |
| Magnes żelazny | 100 G |
| Stabilne pola magnetyczne w laboratoriach | 4×10^5 G |
| Najsilniejsze pola magnetyczne w laboratoriach | 10^7 G |
| Najsilniejsze pola magnetyczne w normalnych gwiazdach | 10^6 G |
| Pola pulsarów milisekundowych | $10^8 - 10^9$ G |
| Typowe pola radiopulsarów | 10^{12} G |
| Magnetary | $10^{14} - 10^{15}$ G |

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

a



b



c



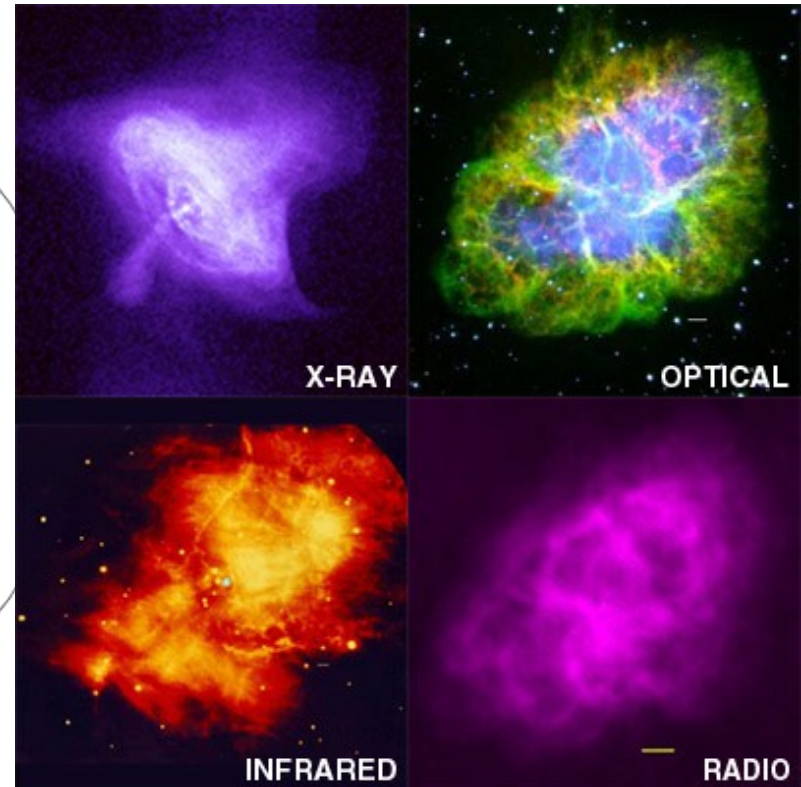
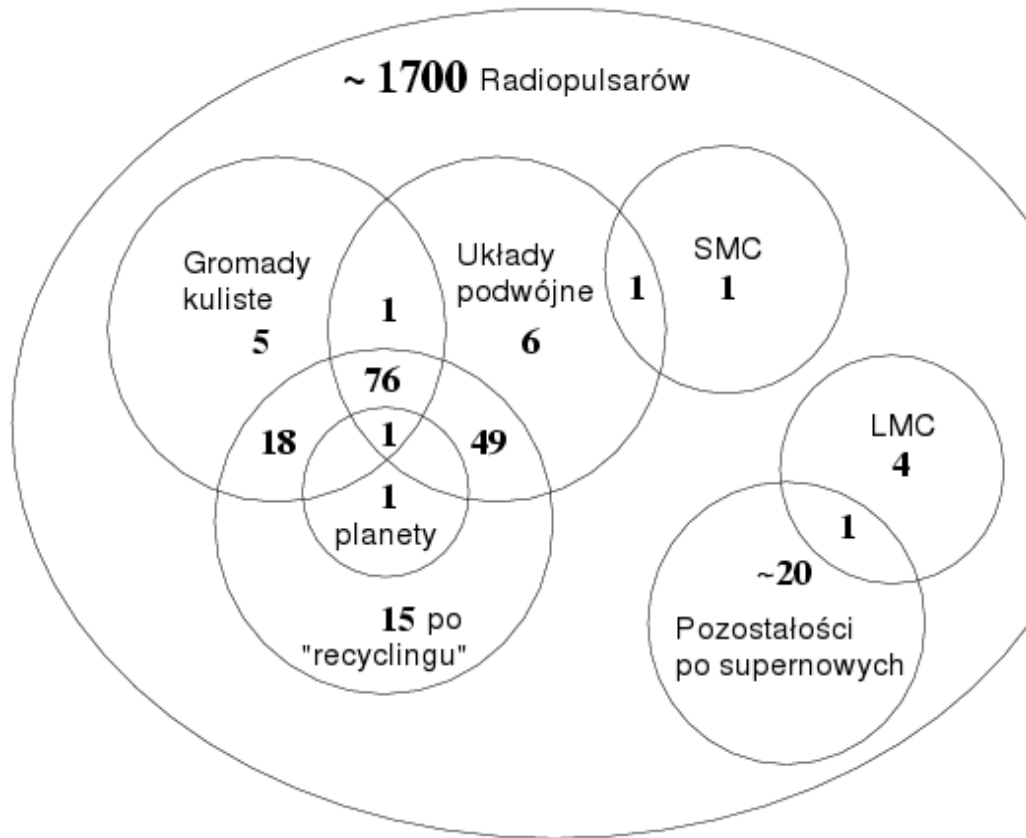
Atom wodoru w polu B:

a) $B < 10^9$ G

b) $B \sim 10^{10}$ G

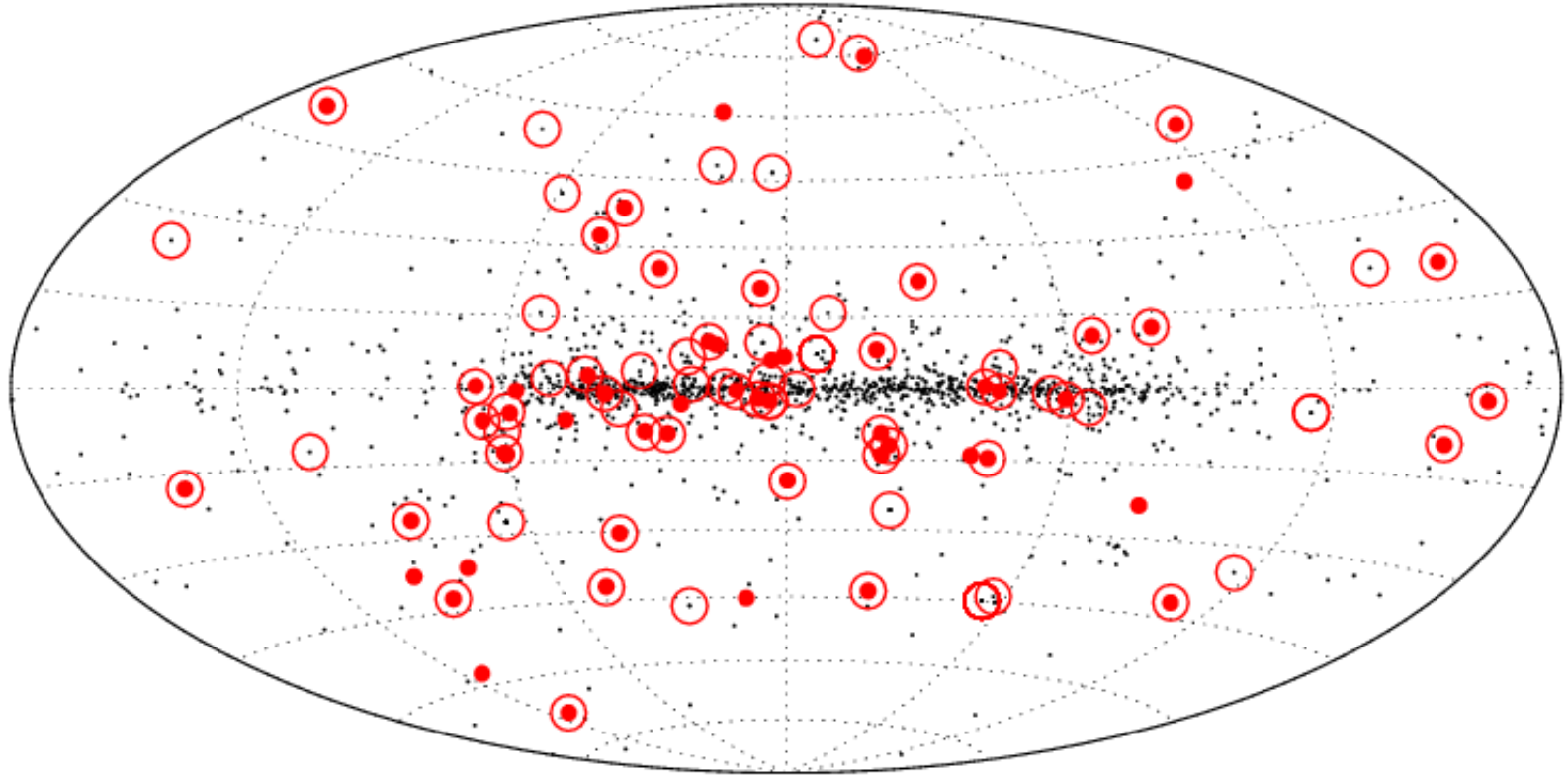
c) $B \sim 10^{12}$ G

Populacja pulsarów



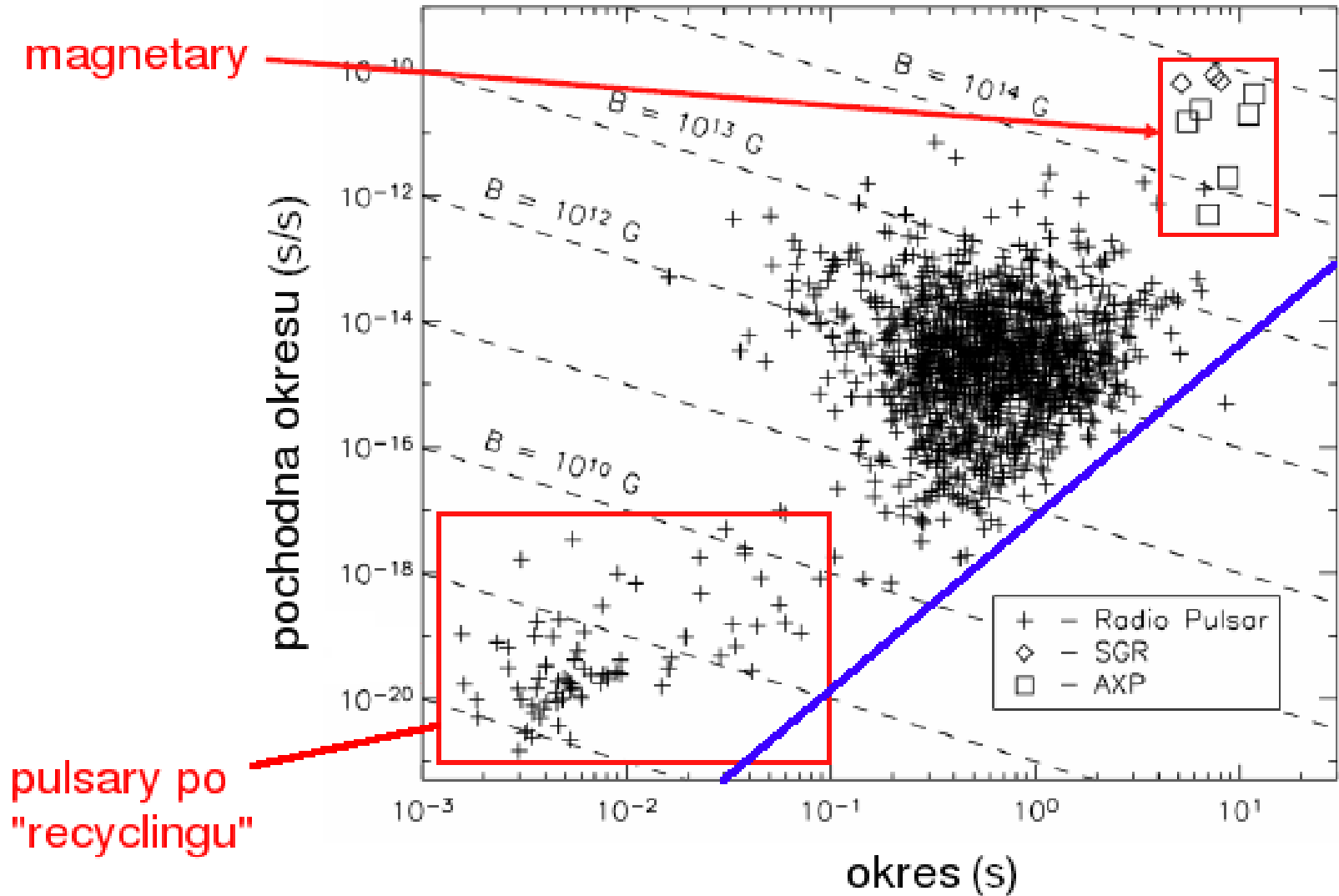
Mgławica Kraba (M1)

Pulsary: rozkład na niebie



(czerwone kropki: pulsary milisekundowe, kółka:
w układach podwójnych)

Cykl życiowy pulsarów



Pierwszy pozaziemski układ planetarny

Pulsar odkryty przez A. Wolszczana
w 1990 r. w gwiazdozbiornie Panny:

- okres obrotu 6.22 ms,
- odległość ~980 lat świetlnych,
- 3 planety!

$$A \quad 0.025 M_{\oplus}$$

$$B \quad 4.3 \pm 0.2 M_{\oplus}$$

$$C \quad 3.9 \pm 0.2 M_{\oplus}$$



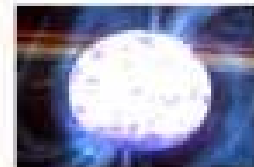
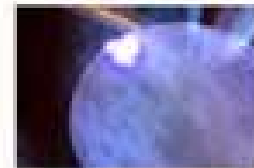
Pulsary milisekundowe

Gwiazdy w sile wieku ($>10^7$ lat),
o słabym polu magnetycznym ($\sim 10^8$ G)

Bardzo regularne pulsy:
 $(dP/dt)/P \sim 10^{-17} \text{ s}^{-1}$

“Rozkręcanie” poprzez akrecje materii
w układzie podwójnym

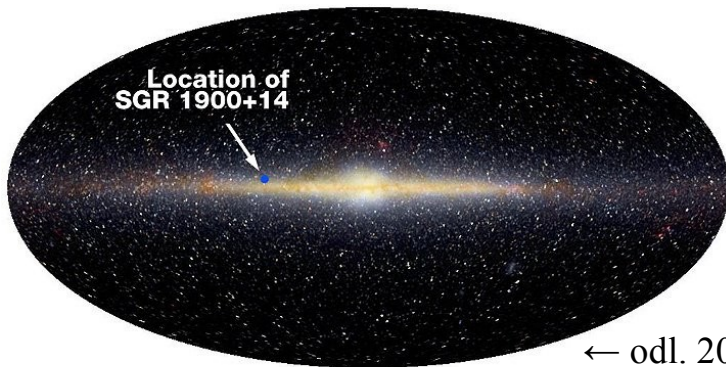
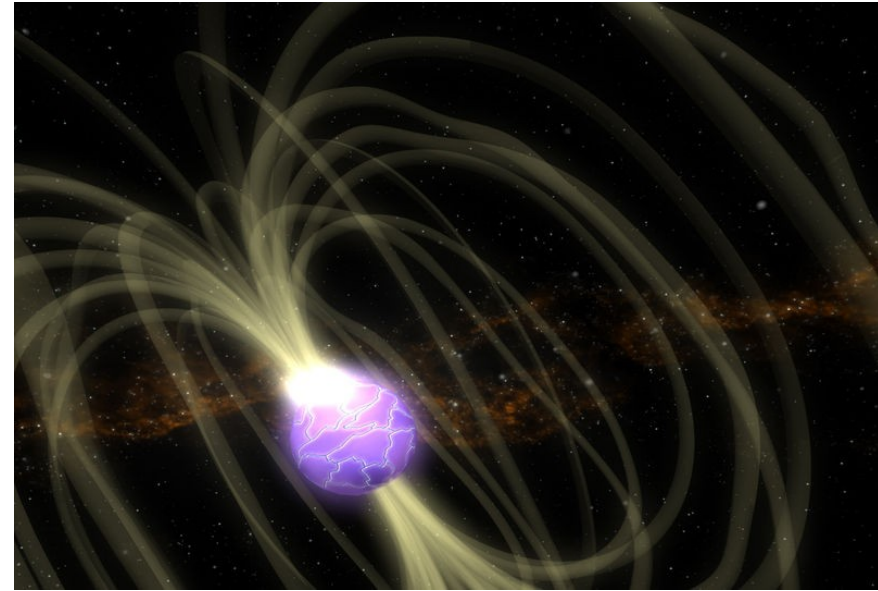
“Zapalanie” materii: emisja twardego
promieniowania)



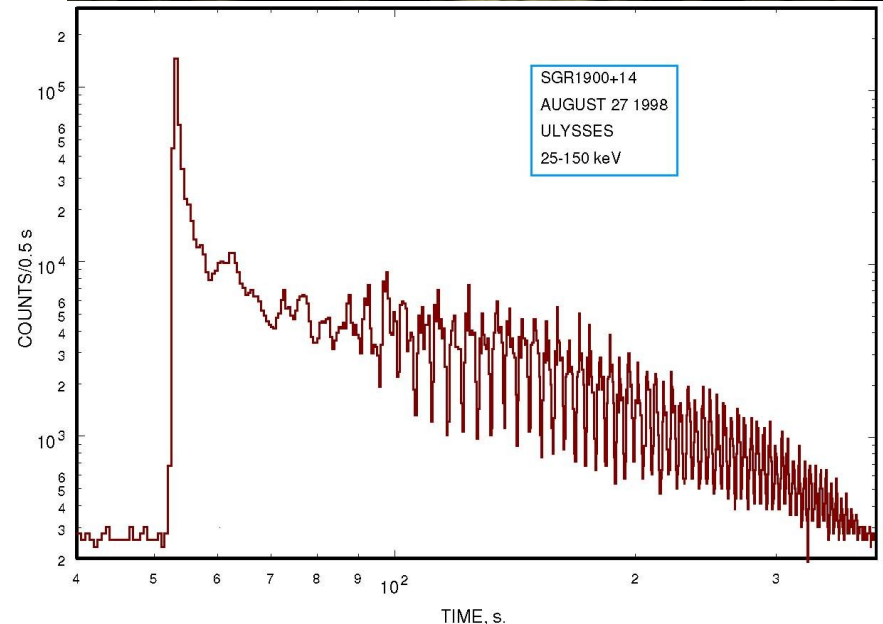
Magnetary

Gwiazdy neutronowe o **bardzo** silnych polach magnetycznych: $10^{14} - 10^{15}$ G

- Obserwacje astrofizyczne dwu typu obiektów:
- Anomalous X-ray Pulsars (AXP, Anomalne Pulsary Rentgenowskie np. XTE J1810-197)
- Soft Gamma-Repeaters (SGR, Powtarzalne źródła miękkich promieni gamma)



← odl. 20 000
lat świetlnych



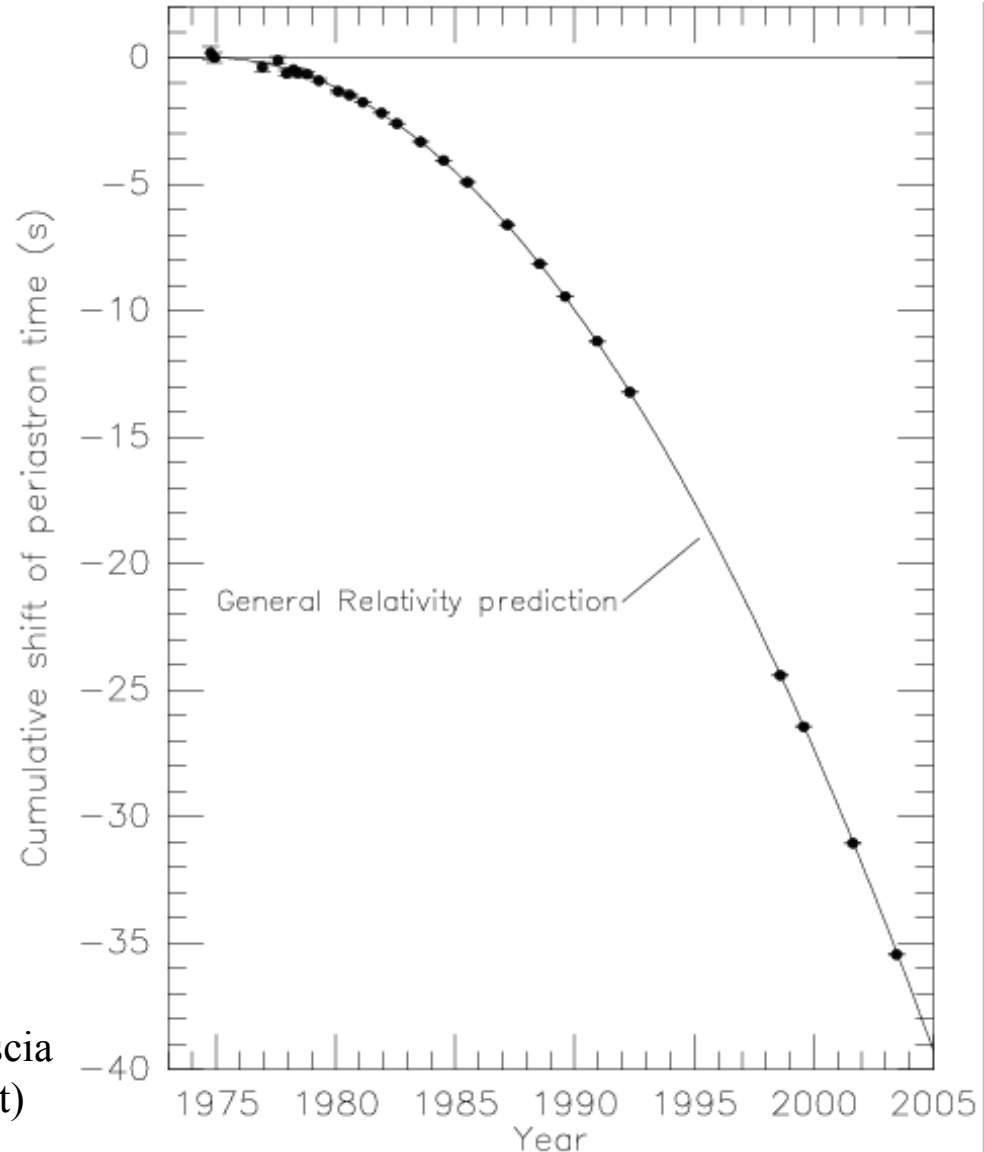
Testy Ogólnej Teorii Względności

Relatywistyczne
układy podwójne gwiazd
neutronowych

Pierwszy tego typu
obiekt (PSR 1913+16)
odkryty przez R. A. Hulse'a
i J. H. Taylora w 1974r.
(nagroda Nobla w 1993r.)

Okres orbitalny: 7.75
godziny!

(tutaj: zmiana momentu przejścia
przez periastron w ciągu 30 lat)



Testy Ogólnej Teorii Względności

Masy: 1.337 oraz 1.25 mas Słońca

Okres orbitalny: 2.4 godziny!

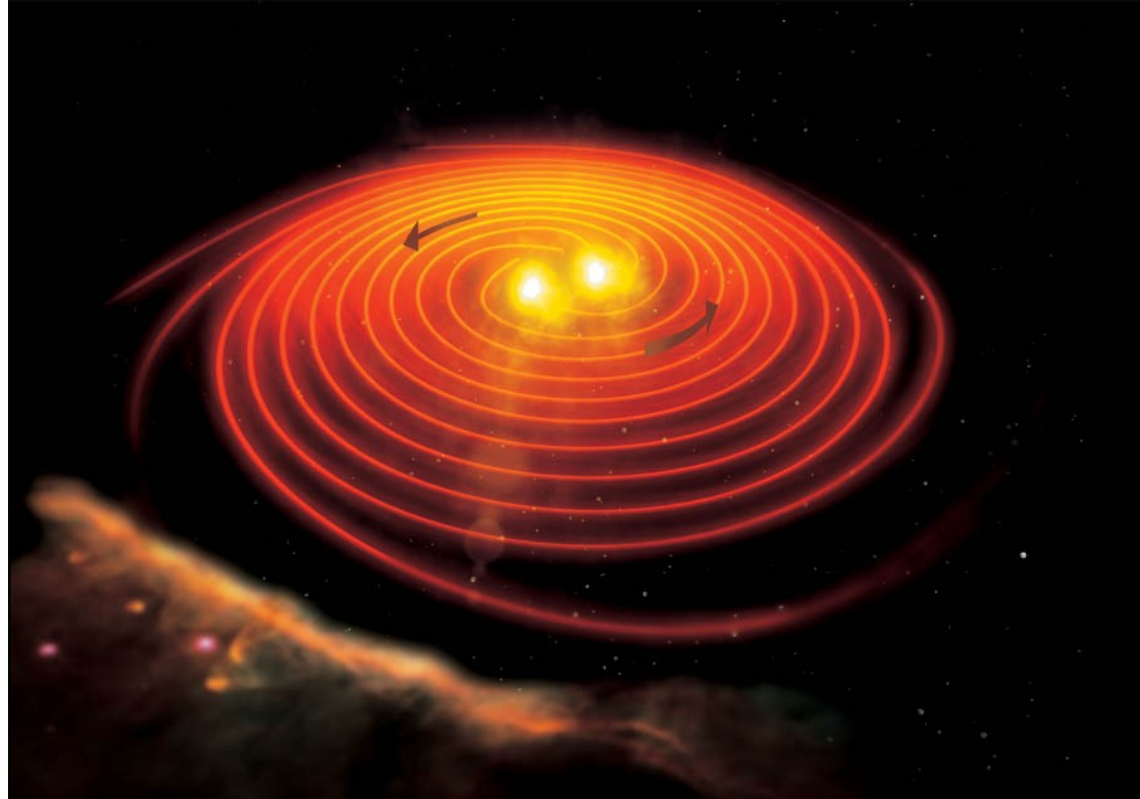
Efekty OTW:

Zbliżają się do siebie o 7mm/dzień!

Ruch periastronu: $17^\circ/\text{rok}$!!!

(dla porównania, ruch peryhelium Merkurego: $43''/100 \text{ lat}$)

Czas życia układu:
85 mln lat

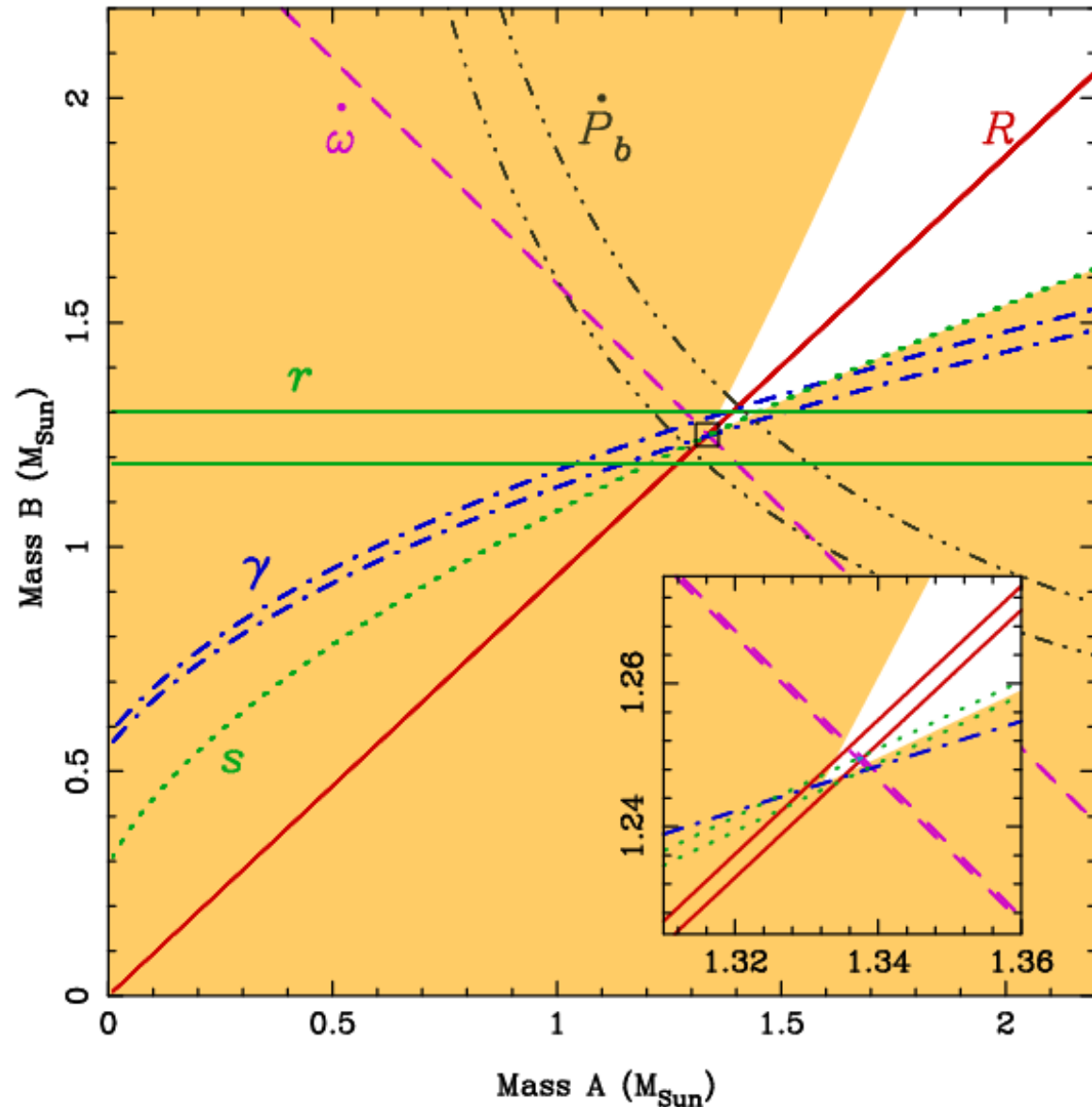


Układ PSR J0737-3039, w którym obie gwiazdy są widoczne jako pulsary o okresach 23ms i 2.8s

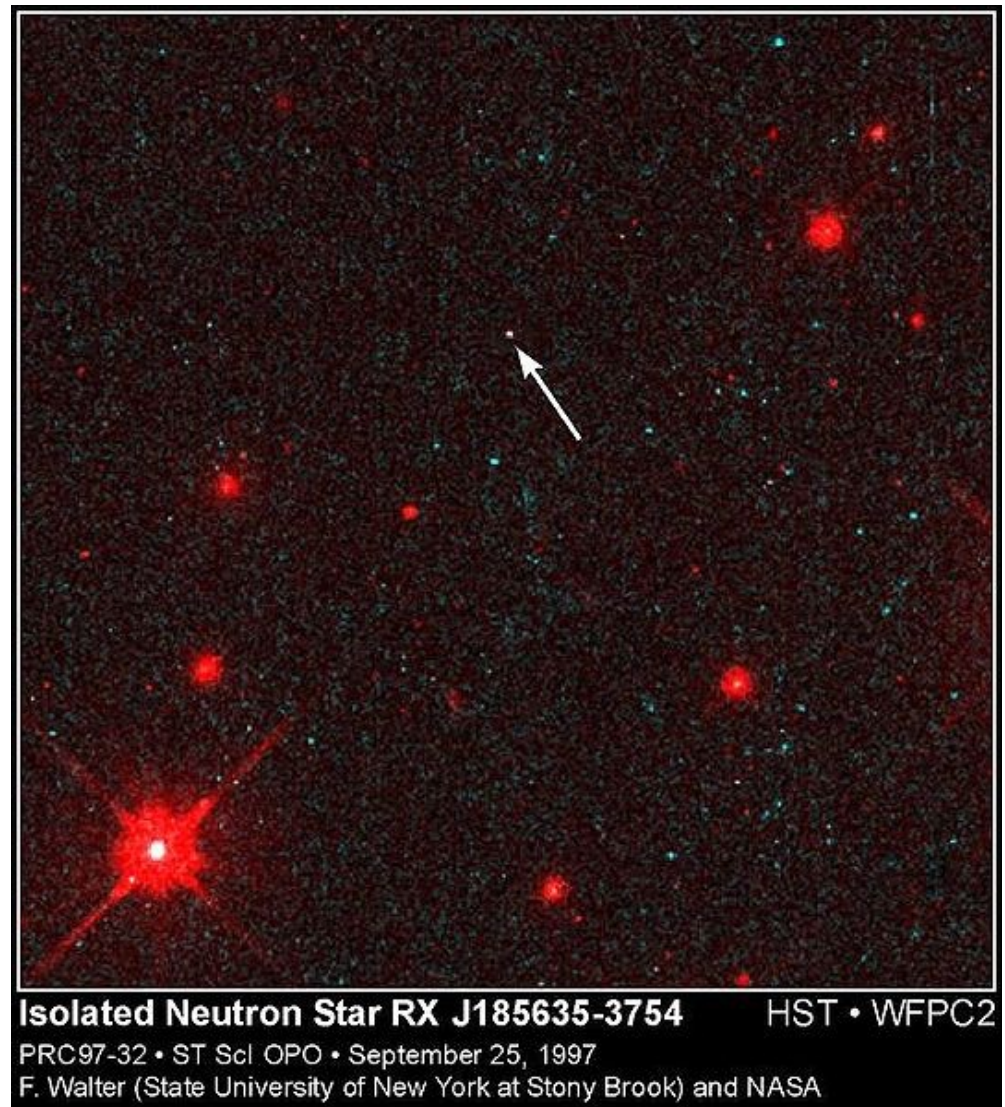
Testy Ogólnej Teorii Względności

Pośredni dowód na istnienie fal grawitacyjnych:

- Poczerwienie grawitacyjne,
- Zmiana okresu orbitalnego,
- ruch periastronu,
- Efekt Shapiro



W skrócie: Gwiazdy neutronowe stanowią nie tylko bardzo różnorodną i ciekawą grupę obiektów, ale są również jedynymi w swoim rodzaju laboratoriami kosmicznymi do badania grawitacji, testowania fizyki jądrowej oraz cząstek elementarnych



Dziękuję za uwagę