

Ewolucja Wszechświata

Wykład 10

Gwiazdy neutronowe

Gwiazdy neutronowe

Gwiazda w końcowym etapie swojej ewolucji, zbudowana ze zdegenerowanych neutronów.

Obiekt o rozmiarach rzędu 10 - 20 km, masie zbliżonej do masy Słońca.

Analogia do stanu podstawowego atomu.

Neutrony zajmują najniższe poziomy energetyczne i one określają rozmiary gwiazdy, podobnie jak elektrony zajmujące najniższe stany energetyczne w atomie określają jego wielkość.

Istnienie gwiazd neutronowych zostało przewidziane teoretycznie w 1938 r. (L. Landau), a pierwszych obserwacji dokonano w 1967 r. (odkrycie pulsara przez J. Bell i A. Hewisha).

Gwiazdy neutronowe

Liczba znanych pulsarów – około 2000.

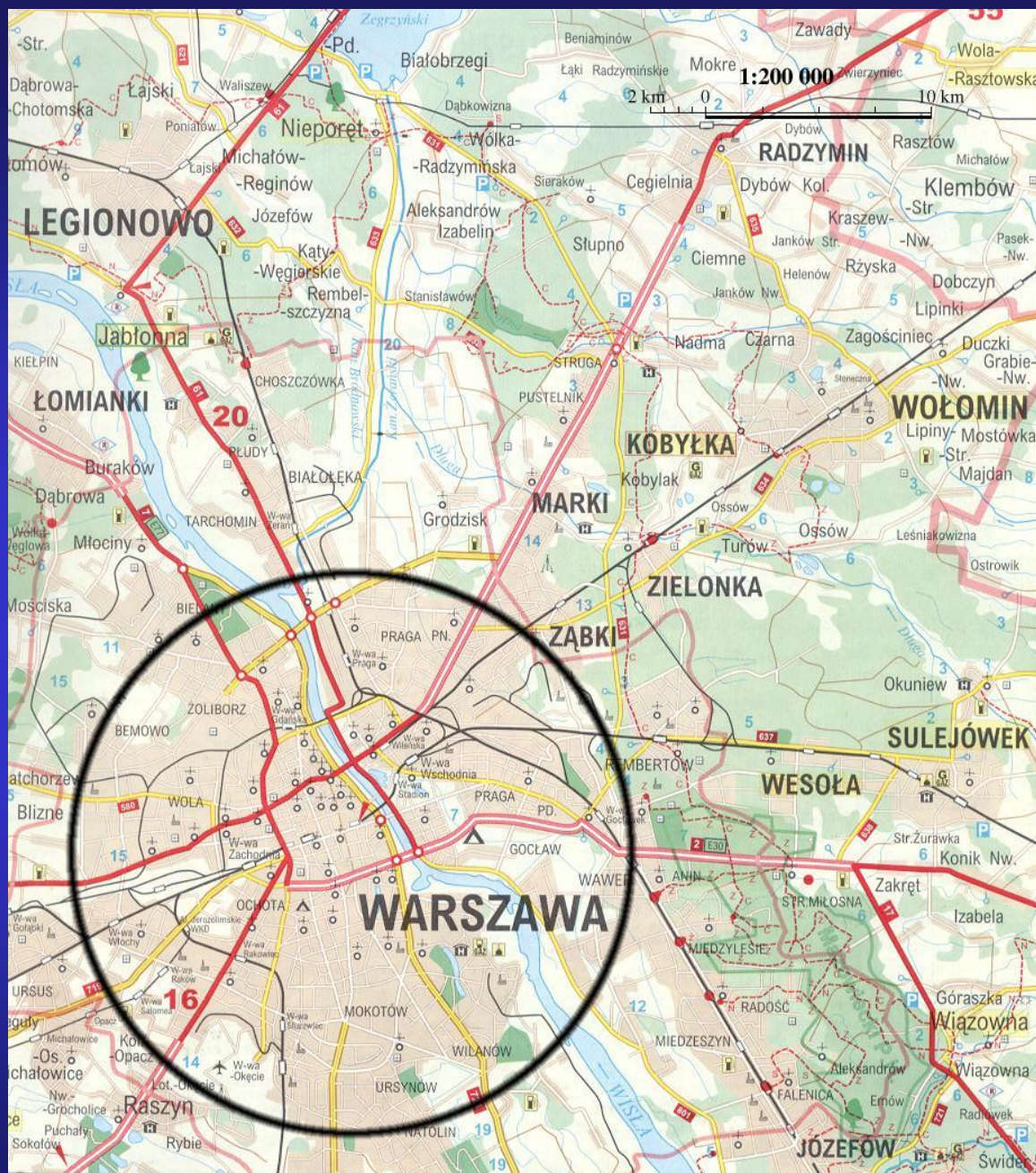
Liczba pulsarów w naszej Galaktyce rzędu 10^8

Energia grawitacyjna nukleonu na powierzchni gwiazdy neutronowej ~ 100 MeV

Energia wiązania na nukleon w jądrze atomowym ~ 8 MeV

Gwiazda neutronowa związana jest siłami grawitacji.

Rozmiary gwiazdy neutronowej



Gwiazdy neutronowe

Gwiazda neutronowa rodzi się jako obiekt bardzo gorący, o temperaturze wnętrza $T \sim 10^{11}$ K

Szybko stygnie – już po roku temperatura spada do $T \sim 10^9$ K

Gęstość materii we wnętrzu gwiazdy neutronowej rośnie od kilku g/cm^3 na powierzchni do $\sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$ w jej centrum. Ogromna siła grawitacji powoduje, że już na głębokości kilku metrów gęstość materii przekracza 10^6 g/cm^3 .

Gwiazdy neutronowe powstają w wyniku zapadania grawitacyjnego centralnych rdzeni masywnych gwiazd ($M > 8$ mas Słońca), poprzedzającego wybuch supernowej.

Gwiazdy neutronowe

W czasie kurczenia jądra zostaje zachowany moment pędu.

Wielokrotne zmniejszenie promienia powoduje znaczny wzrost prędkości rotacji.

Ilustracja zachowania momentu pędu



Kliknij na obrazek

Gwiazdy neutronowe

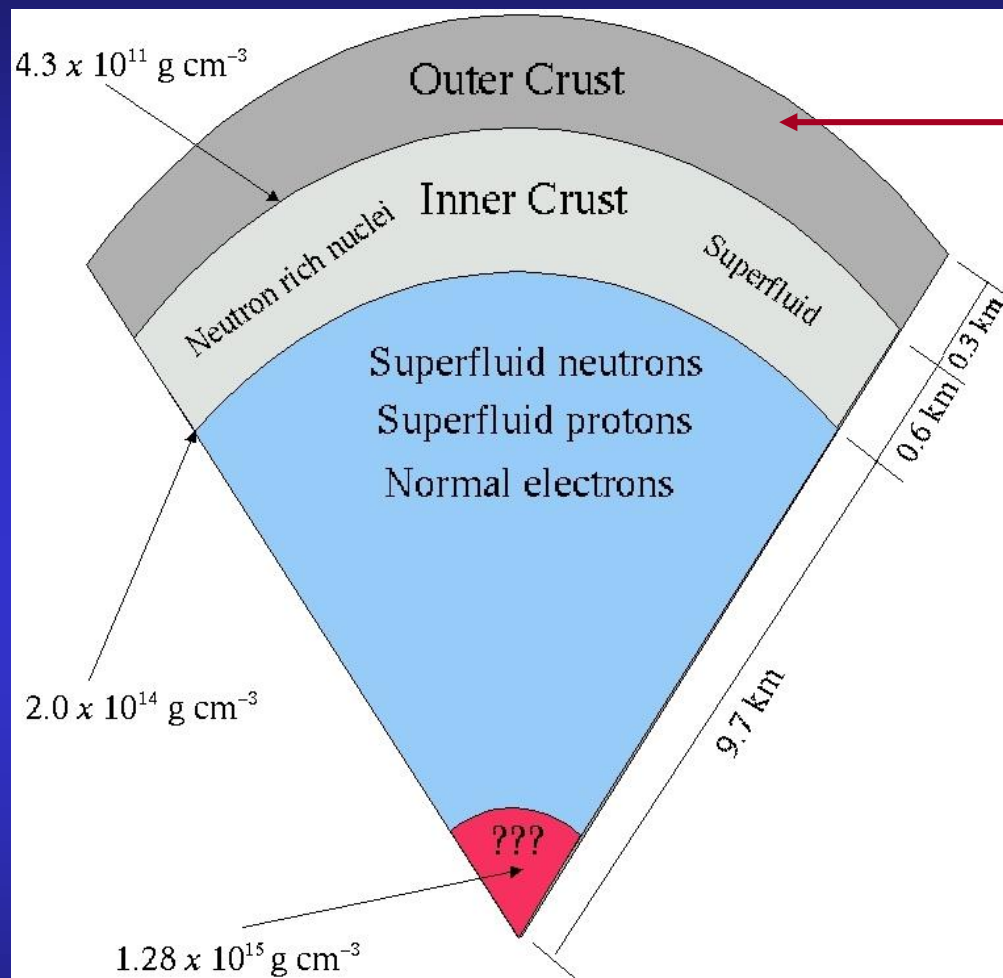
Gwiazdy neutronowe mają bardzo silne, dipolowe pola magnetyczne. Bieguny magnetyczne nie muszą znajdować się na osi rotacji.

Niektóre gwiazdy neutronowe obserwujemy jako pulsary. Pulsary wysyłają krótkie błyski o częstościach radiowych, powtarzające się z zegarową dokładnością z okresem od milisekund do sekund.

Fale radiowe generowane są przez relatywistyczne elektrony, krążące wokół linii sił pola magnetycznego.

Kierunek emisji promieniowania ograniczony jest do wąskiego stożka w przestrzeni, który szybko rotuje wraz z gwiazdą.

Gwiazdy neutronowe



Neutron Star Pizza

Jądra znajdujące się w najbardziej zewnętrznej warstwie gwiazdy nie ulegają rozpadowi, lecz tworzą rodzaj skorupy krystalicznej materii jądrowej, utrzymującej materię gwiazdy w równowadze.



Struktura gwiazdy neutronowej

Powierzchnia

Bardzo cienka atmosfera (kilka centymetrów grubości).

Zjonizowany gaz jest skompresowany do wielkiej gęstości 10^3 g/cm^3

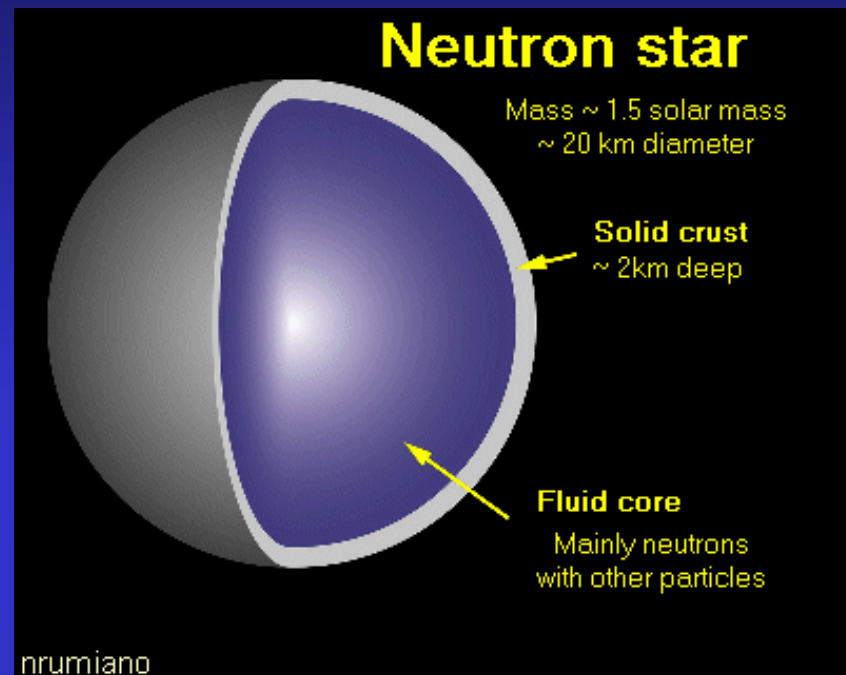
Atmosfera może występować w stanie ciekłym lub stałym.

Temperatura powierzchni wynosi około 10^7 K .

Struktura gwiazdy neutronowej

Zewnętrzna skorupa

Zewnętrzna warstwa skorupy
- sieć krystaliczna jąder ^{56}Fe



*Powierzchnia jest twarda i gładka –
najwyższe góry nie przekraczają mikrometra.*

Struktura gwiazdy neutronowej

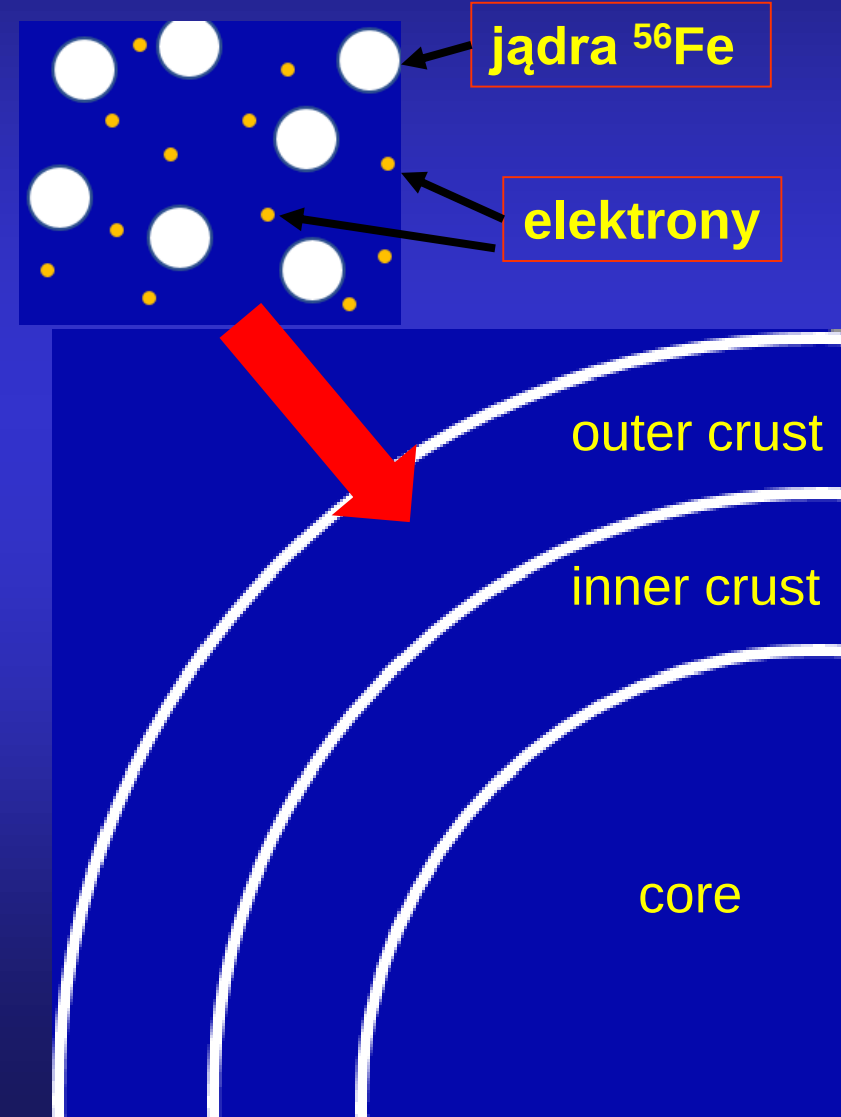
Zewnętrzna warstwa skorupy - sieć krystaliczna jąder atomowych zanurzonych w jednorodnym gazie elektronowym.

Obecność gęstego gazu elektronowego wymusza malenie Z/A wraz ze wzrostem gęstości.

Gęstość materii u podstawy skorupy zewnętrznej (*outer crust*) wynosi $(4 - 6) \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$.

$$Z/A = 1/3$$

Masa skorupy zewnętrznej to typowo $10^{-5} M_{\text{Sun}}$, grubość sięga 400 m.

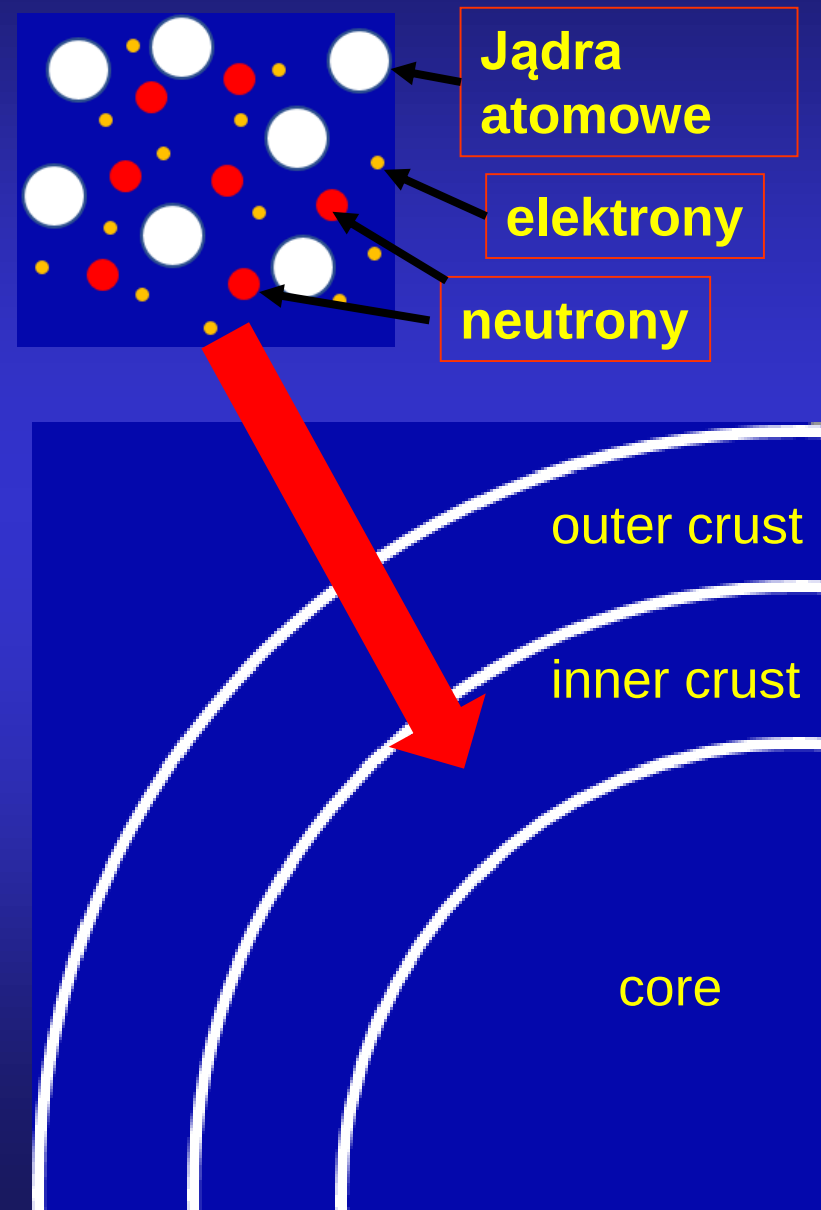


Struktura gwiazdy neutronowej

Z wierzchu głównie jądra żelaza ^{56}Fe , głębiej – cięższe jądra aż do $Z = 40$, $A = 200$

Jądra o bardzo dużym nadmiarze neutronów są stabilne dzięki obecności gęstego, zdegenerowanego gazu neutronów.

Przy gęstości 10^6 g/cm^3 (na głębokości kilku metrów) elektrony przechodzą w stan degeneracji – przewodnictwo elektryczne i cieplne jest olbrzymie, ponieważ swobodne elektrony mogą przebywać duże odległości bez oddziaływań.



Struktura gwiazdy neutronowej

Skorupa wewnętrzna (*inner crust*) oprócz jąder atomowych i elektronów zawiera gaz neutronów. Jądra tworzą sieć krystaliczną i są zanurzone w gazie neutronowym i elektronowym.

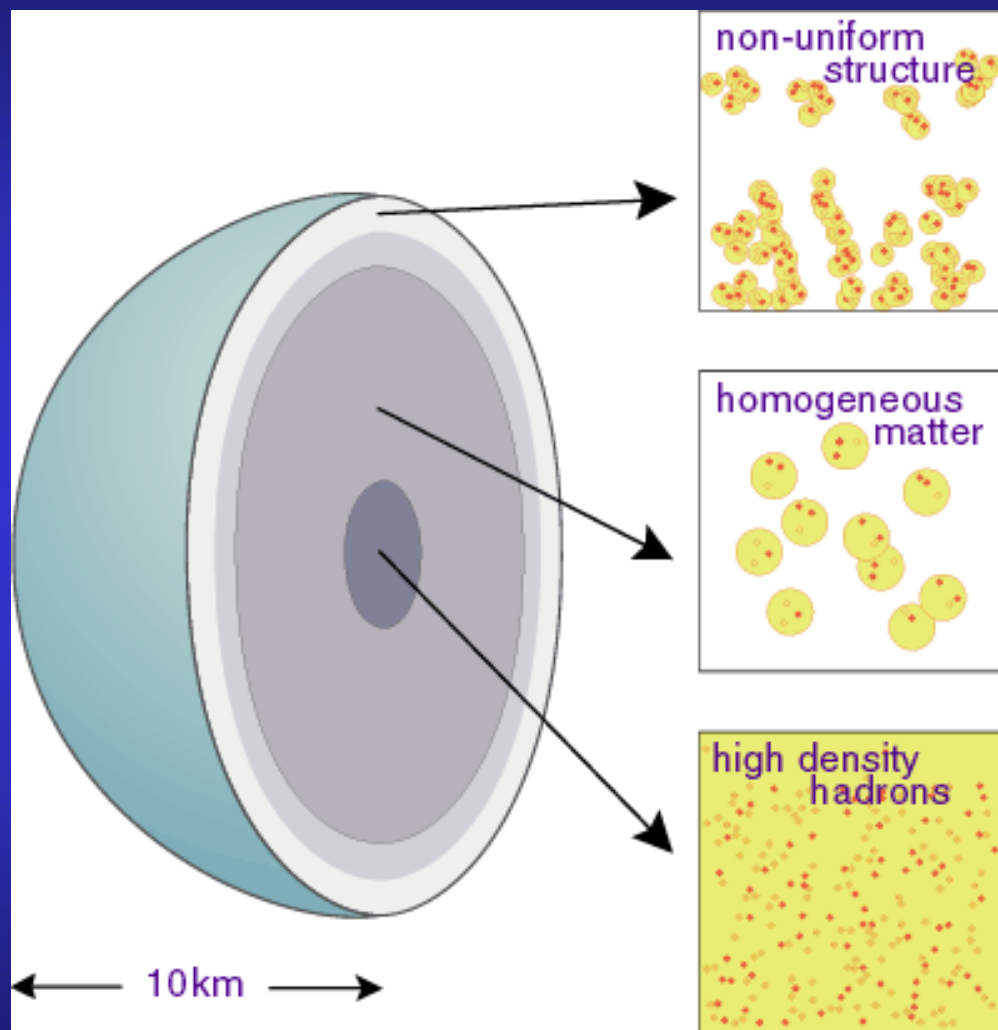
Z/A nadal maleje wraz ze wzrostem gęstości.

Udział gazu neutronowego rośnie wraz z gęstością.

Na głębokości ok. 1 km struktury jądrowe znikają.

Głębiej materia gwiazdy neutronowej tworzy jednorodną ciecz złożoną głównie z neutronów, z domieszką kilku procent protonów i elektronów.

Struktura gwiazdy neutronowej

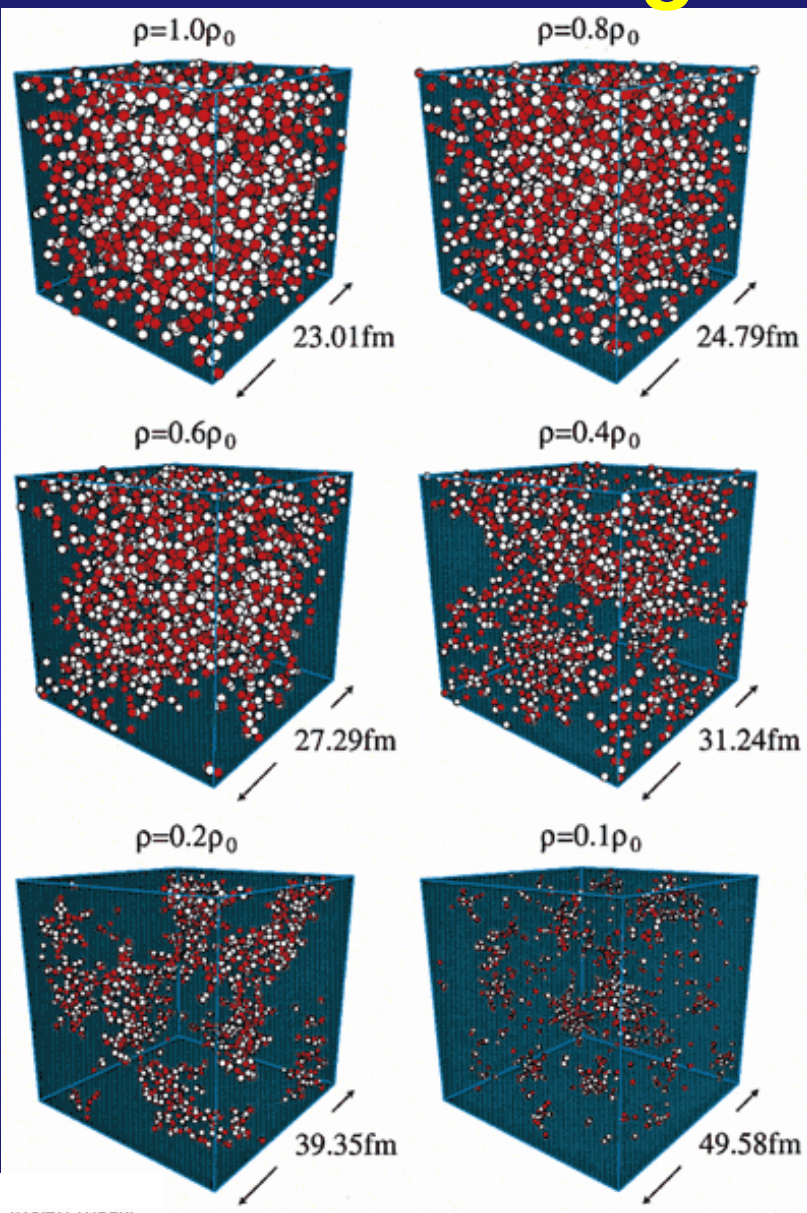


Neutrony tworzą skomplikowane struktury - gęstość jest mniejsza niż normalna gęstość jądrowa.

Jednorodna materia

Bardzo gęsta materia hadronowa – gęstość znacznie przewyższa normalną gęstość jądrową.

Struktura gwiazdy neutronowej



Rozkład nukleonów w materii jądrowej przy malejącej gęstości ρ przewidziany przez model teoretyczny (ρ_0 – gęstość jądrowa).
Czerwone – protony, białe – neutrony

Przy niższej gęstości tworzą się skomplikowane struktury.

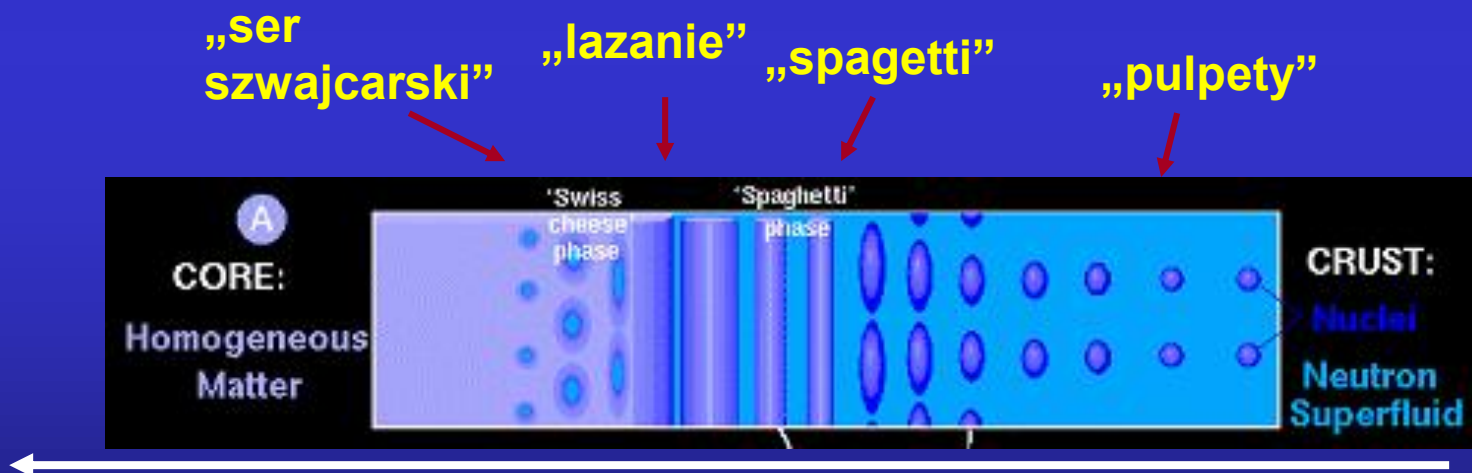
T. Maruyama et al., Quantum Molecular Dynamics Approach to the Nuclear Matter below the Saturation Density, Phys. Rev., C, 57 (2), 655 (1998).

Struktura gwiazdy neutronowej

Wewnętrzna skorupa i zewnętrzna część jądra

Przy gęstości $4 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$ neutrony wypływają z jąder. Łączą się w pary o spinie całkowitym 1 (pary Coopera - bozony), które tworzą nadciekłą ciecz neutronową.

Przy tych gęstościach neutrony formują egzotyczne obiekty, jak:



gęstość

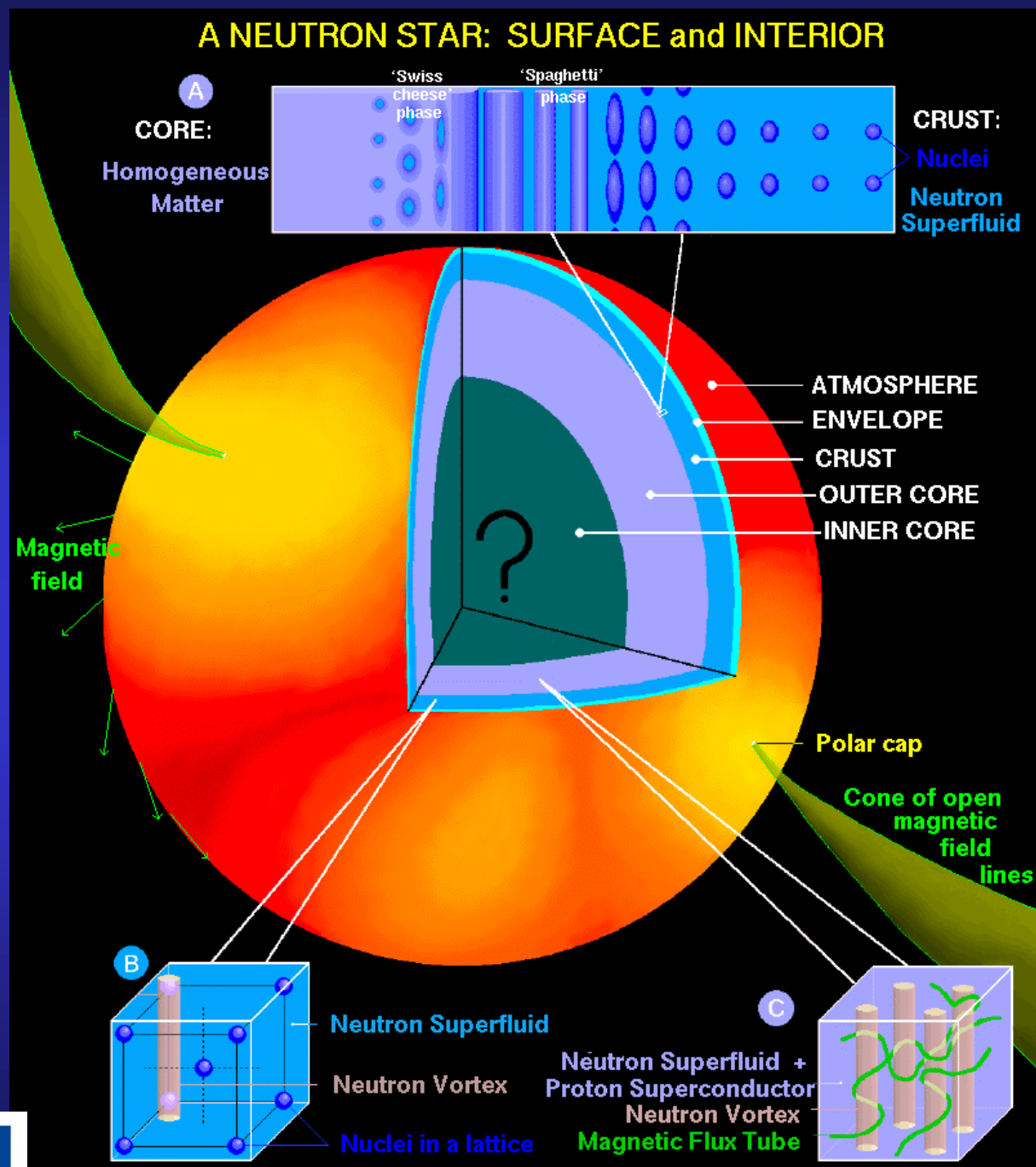
Jednocześnie nieliczne protony łączą się w pary Coopera (bozony), tworząc nadprzewodnik.

Struktura gwiazdy neutronowej

Wewnętrzna część jądra

Przy gęstości przewyższającej 2 lub 3 krotnie gęstość jądrową $3 \times 10^{14} \text{ gm/cm}^3$ prawdopodobnie neutrony rozpadają się, tworząc plazmę kwarkowo-gluonową.

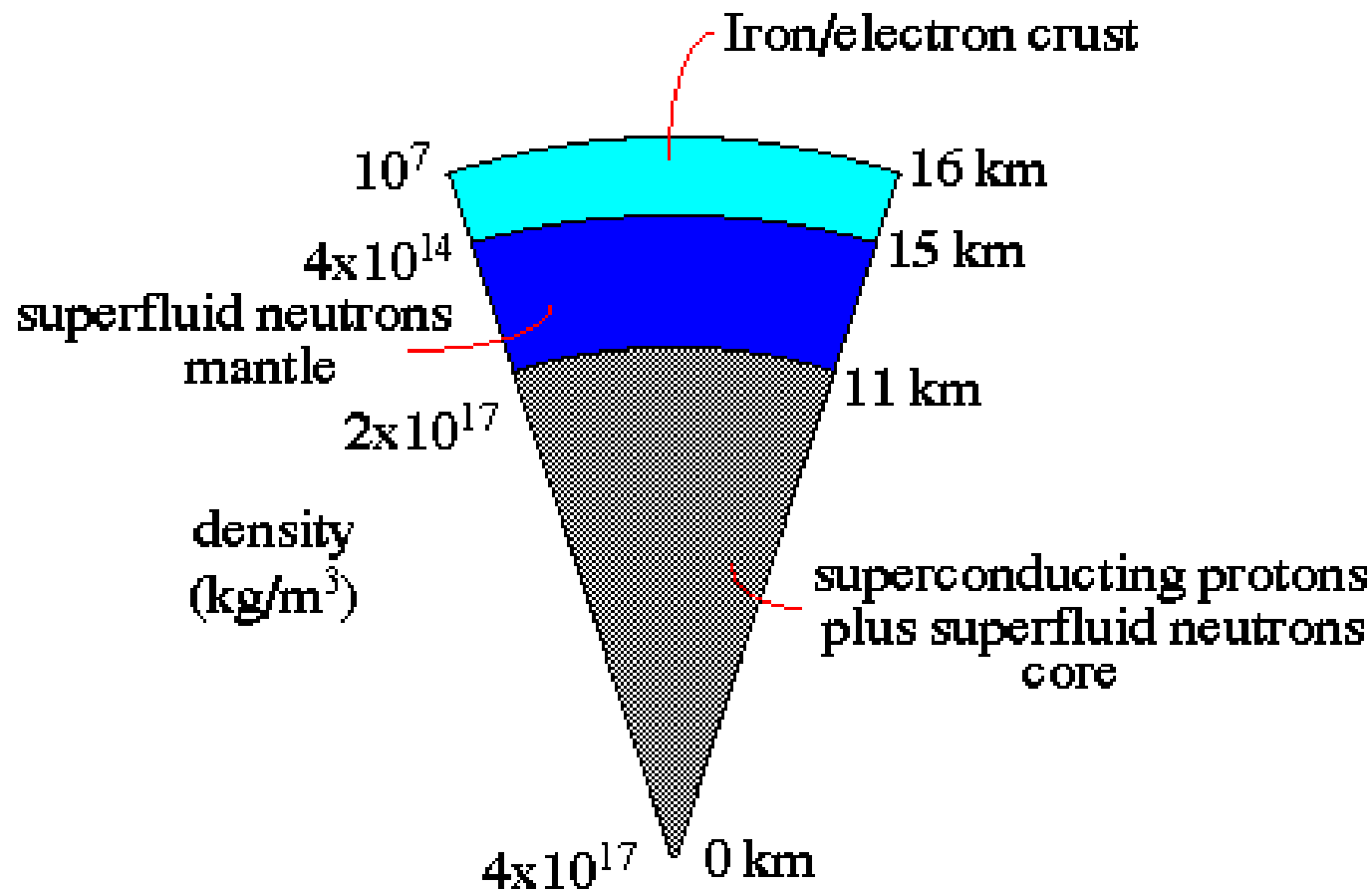
Struktura gwiazdy neutronowej



Krystyna Wosińska, WF PW

Struktura gwiazdy neutronowej

Neutron Star Interior

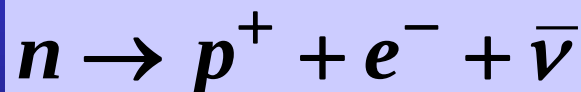
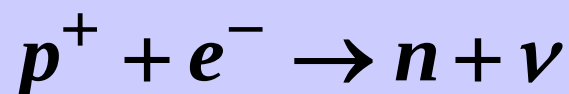


Ewolucja gwiazdy neutronowej

W momencie narodzin gwiazda neutronowa ma temperaturę 10^{12} K

W ciągu kilku sekund temperatura spada poniżej 10^{11} K

Chłodzenie to odbywa się w wyniku emisji neutrin pochodzących z procesów:



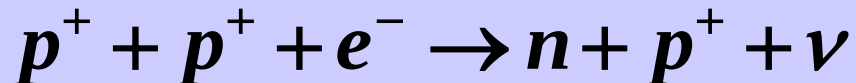
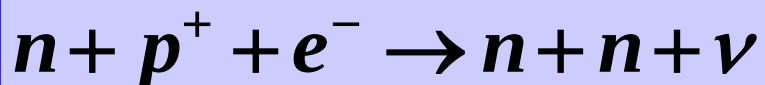
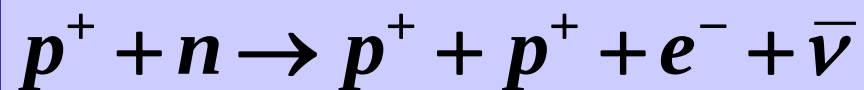
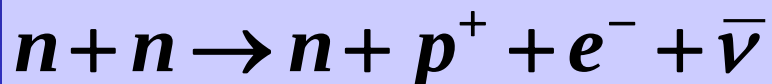
Procesy URCA

$t \sim 1$ min

Procesy URCA ustają dla temperatur około 10^9 K

Ewolucja gwiazdy neutronowej

Zaczynają odgrywać rolę zmodyfikowane procesy URCA:



Procesy MURCA

$t \sim 10^5$ lat

Straty energii w wyniku tych procesów są proporcjonalne do T^8

Ze spadkiem temperatury gwałtownie spada emisja neutrin.

Ewolucja gwiazdy neutronowej

Gdy temperatura spadnie wystarczająco, główną rolę zaczynają odgrywać procesy wolniej zależne od temperatury. Jednym z ważniejszych jest emisja fotonów termicznych. Straty energii z nią związane są proporcjonalne do T^4 .

Wpływ na szybkość chłodzenia mogą mieć:

- Obecność w rdzeniu materii kwarowo-gluonowej (+)
- Obecność w rdzeniu dostatecznej liczby protonów i elektronów , aby mogły zachodzić procesy URCA (+)
- Przechodzenie neutronów w stan nadciekły i protonów w stan nadprzewodzący (-)

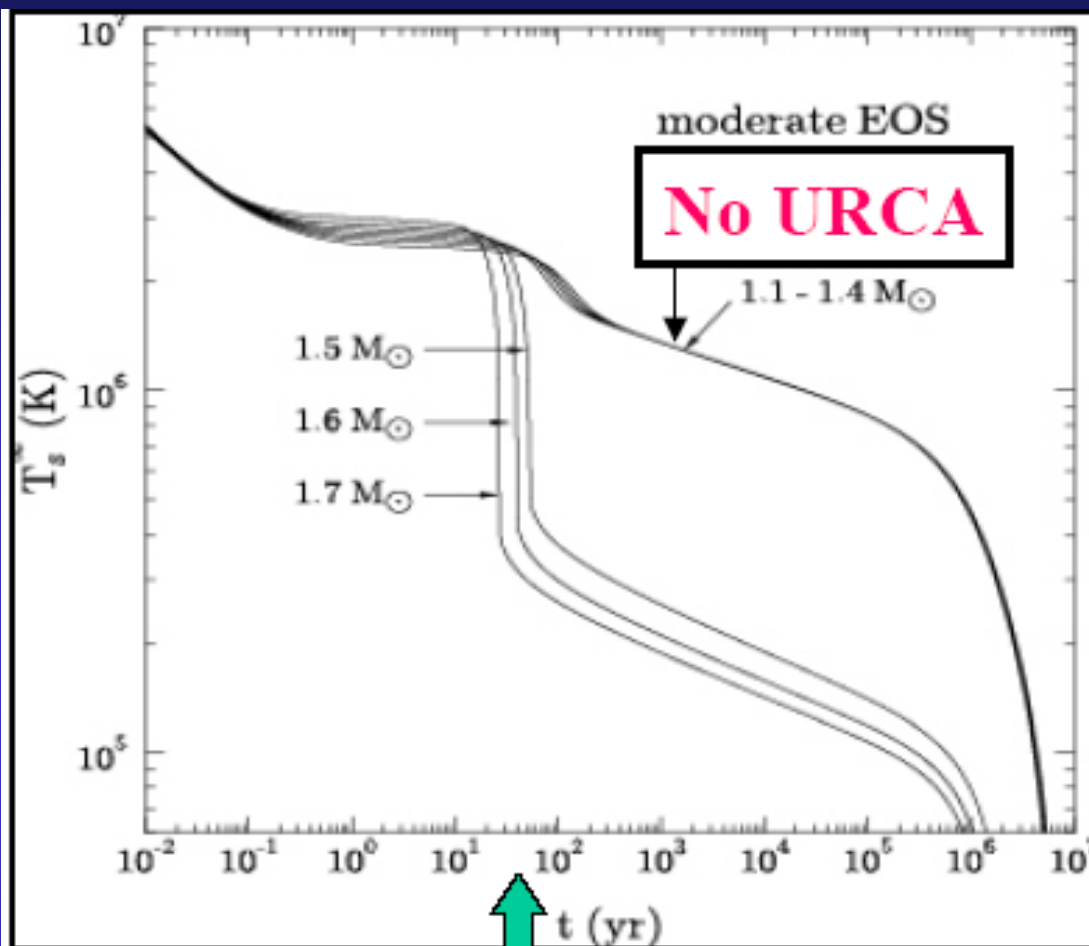
Po kilkuset latach od powstania rdzeń gwiazdy neutronowej stanie się izotermiczny (gdyż będzie nadciekły)

Pomiar temperatury skorupy



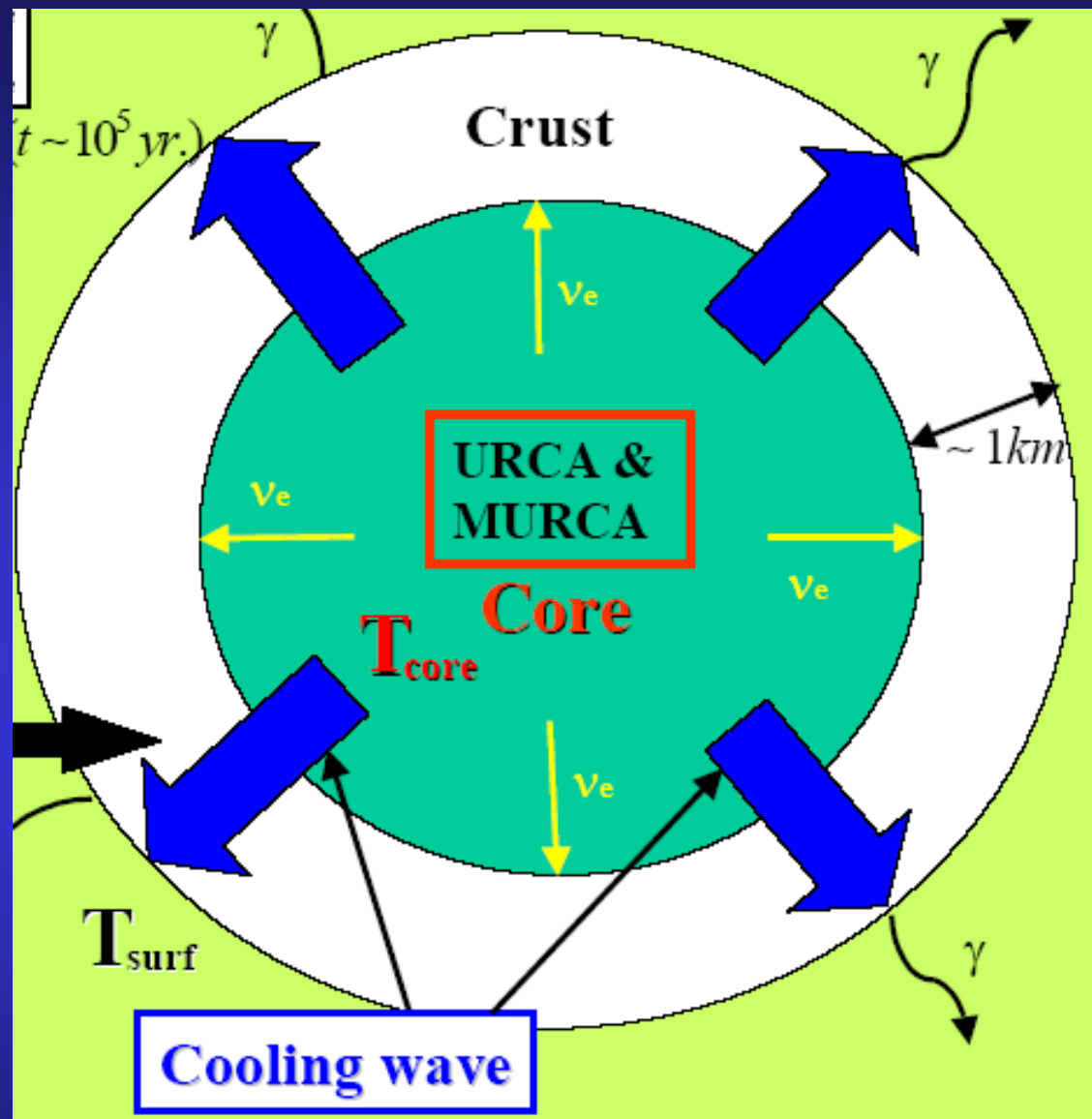
Weryfikacja hipotez budowy wewnętrznej

Tempo chłodzenia dla różnych modeli.



Relaxation time: a typical
time for the cooling wave
to reach the surface

$$T_{\text{core}} < T_{\text{surf}}$$



Rdzeń jest chłodniejszy niż skorupa.

Odkrycie pulsarów

W 1967 w Instytucie Astronomii Uniwersytetu w Cambridge prof. Hewish zajmował się błyskami źródeł promieniowania radiowego.

Doktorantka Hewisha, Jocellyn Bell, zarejestrowała szybkozmienne źródło pulsujące z niezwykle precyzyjnym okresem powtarzalności:

$$T = 1.27376349759 \text{ s}$$

Niebawem odkryto następne o okresie

$$T=0.033 \text{ s}$$



Okres zmian zbyt mały, aby wytłumaczyć pulsacje przez efekt zaćmieniowy w układzie podwójnym lub oscylacje gwiazdy.

*Rozwiązanie:
Rotacja małej gwiazdy ze źródłem promieniowania znajdującym się na jej powierzchni.*

Tak szybki obrót mogła wytrzymać tylko hipotetyczna supergęsta gwiazda neutronowa o promieniu około 10 km.

Odkrycie pulsarów

Początkowo podejrzewano związek pulsarów z pozaziemskimi cywilizacjami – blokada informacyjna zarządzana przez władze Brytyjskiej Marynarki Królewskiej.

Pierwsze pulsary były opatrywane inicjałami **LGM** (od **L**ittle **G**reen **M**an).

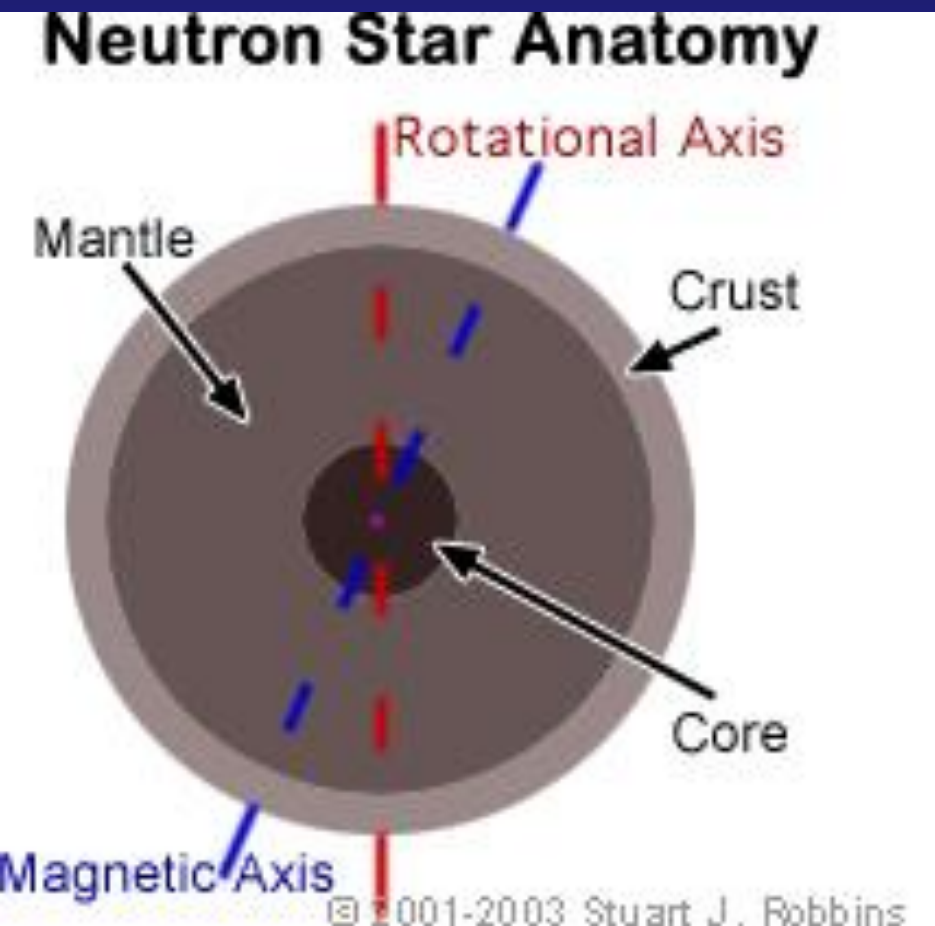


Dopiero stwierdzenie systematycznego wydłużenia się okresu obaliło hipotezę cywilizacji pozaziemskiej.

Inicjały **LGM** zostały zastąpione przez **PSR** (od **P**ulsating **R**adio **S**ource)

Dzisiaj znamy około 2000 pulsarów, obserwowanych w paśmie radiowym, a także optycznym, rentgenowskim i wysokoenergetycznym gamma.

Promieniowanie pulsarów



W czasie grawitacyjnego zapadania gwiazdy zachowany jest strumień pola magnetycznego. Ponieważ zapadająca się gwiazda neutronowa zmniejsza rozmiar około milion razy, jej pole powierzchni zmniejsza się 10^{12} razy.

Typowe pola gwiazd neutronowych - 10^{12} G

Pole magnetyczne Ziemi – 0,6 G

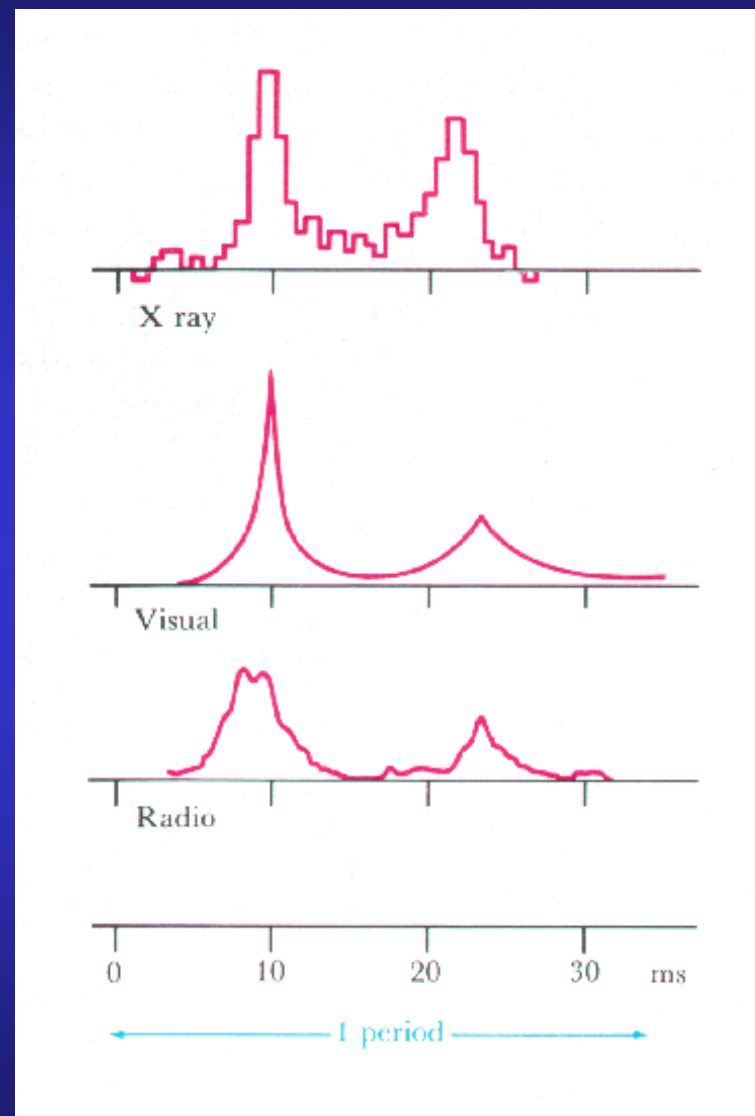
Najsilniejsze pola w laboratorium - 10^7 G

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

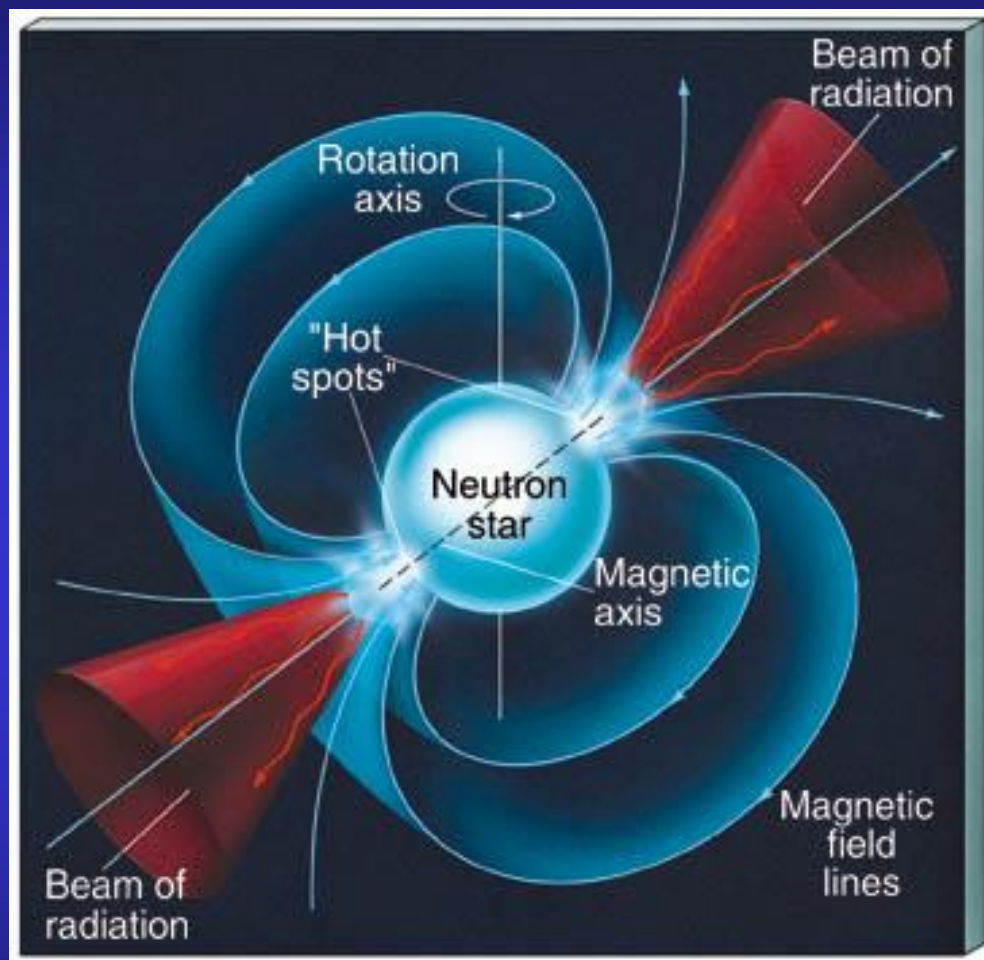
Promieniowanie pulsarów

Skorupa (crust) to jądra żelaza tworzące siatkę krystaliczną. Swobodne elektrony w skorupie krążą wokół linii pola magnetycznego, emitując skolimowaną wiązkę fal w zakresie od rentgenowskich do radiowych.

Kształt impulsów podobny dla wszystkich długości fal, wskazuje, że źródło emisji jest w jednym miejscu gwiazdy.



Promieniowanie pulsarów

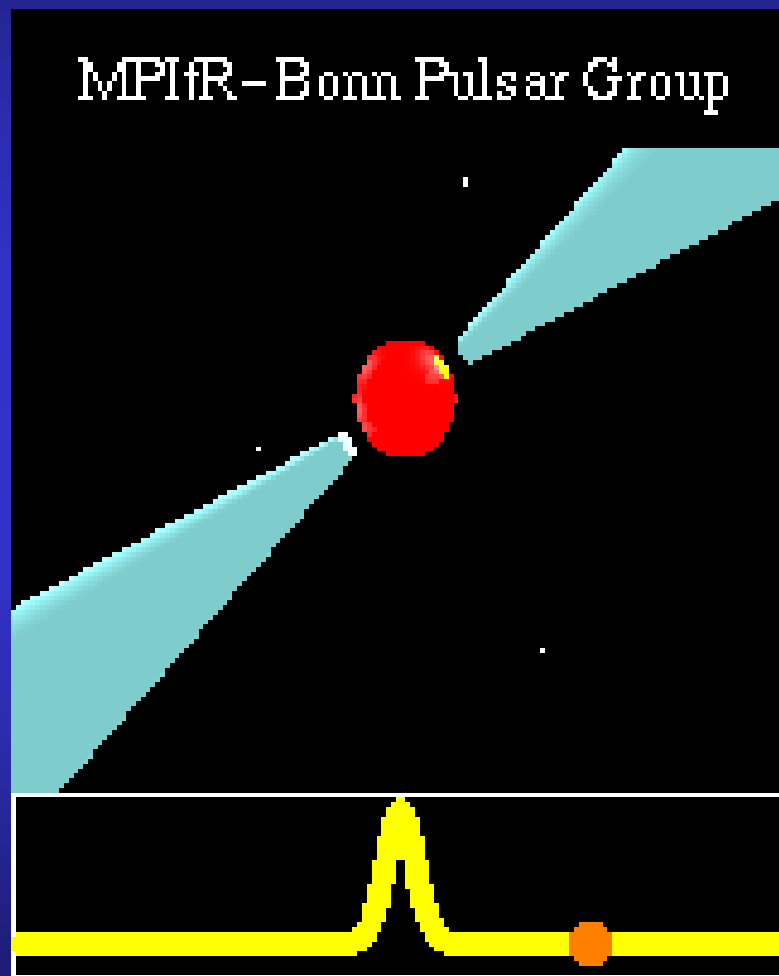


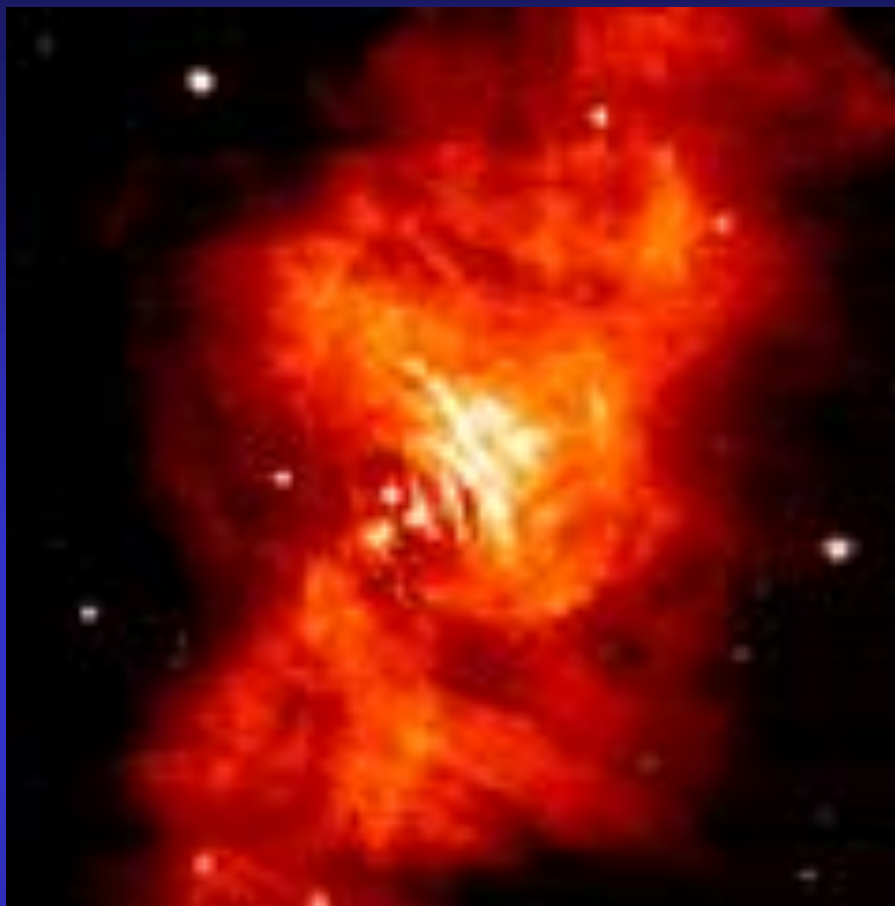
**Bieguny magnetyczne
zwykle nie leżą na osi
rotacji.**

**Wiązka promieniowania
wiruje wokół osi obrotu
gwiazdy – efekt latarni
morskiej.**

***Wiele gwiazd neutronowych nie obserwujemy w postaci pulsarów,
ponieważ ich wiązki radiowe nigdy nie trafiają w Ziemię.***

Promieniowanie pulsarów



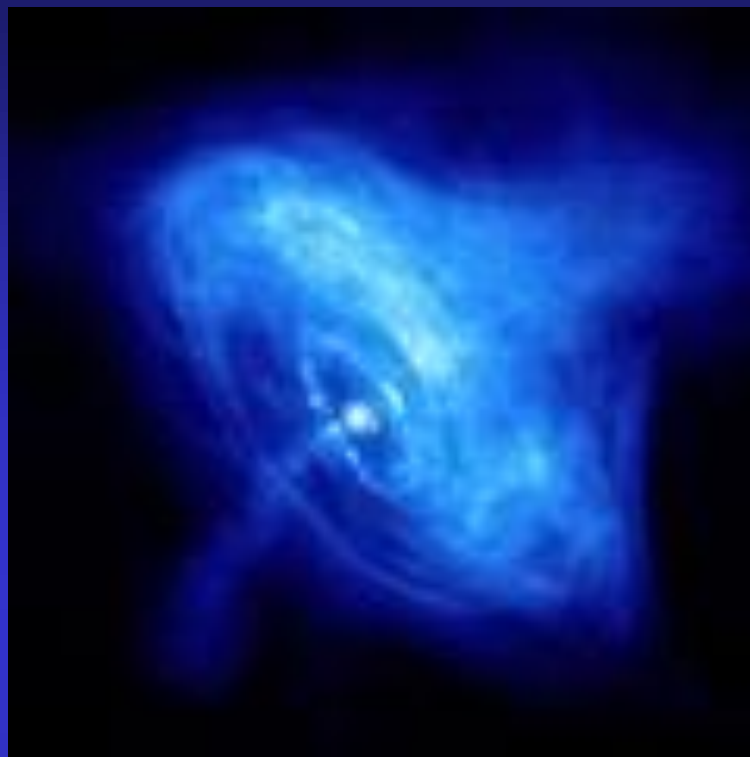


kliknij
←

Na filmie znajduje się Mglawica Krab. Film został zrobiony przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a. Wewnętrzny region mgławicy otaczający pulsar był obserwowany przez teleskop Hubble'a 24 razy, od sierpnia 2000 roku do kwietnia 2001 z 11 dniowymi przerwami.

<http://gallery.astronet.pl/index.cgi?218#zdjecia>





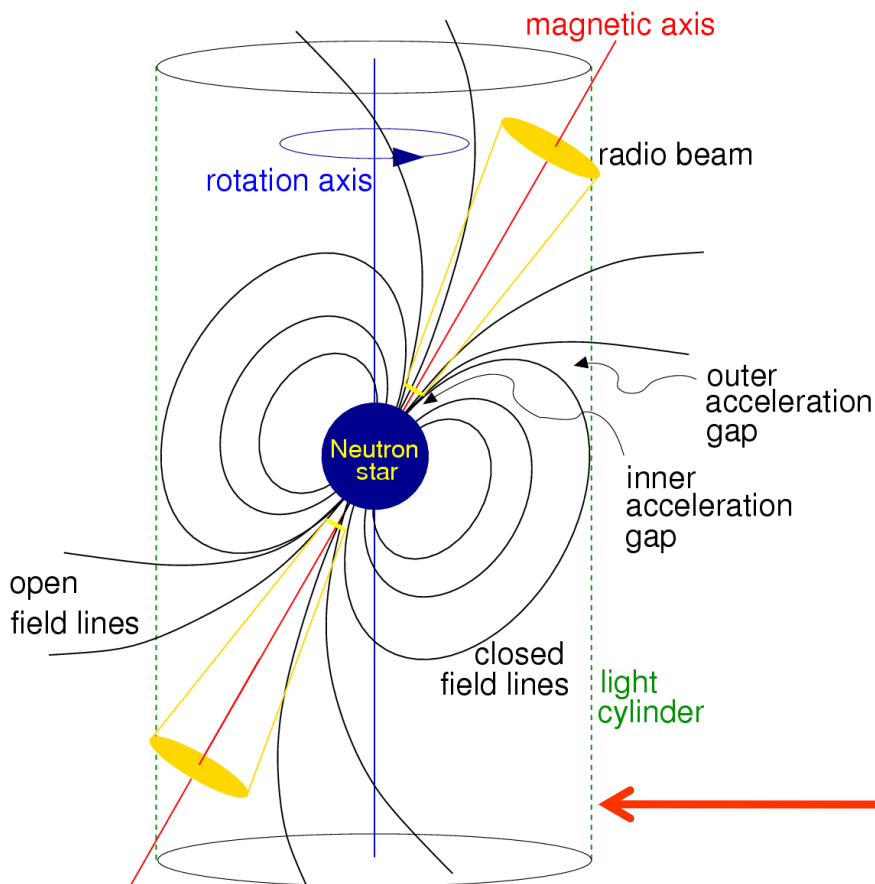
kliknij
←

Ten sam pulsar w promieniach X. Film powstał z nałożenia kilkuset zdjęć zrobionych przez Kosmiczne Obserwatorium Chandra, badające kosmos w promieniach X. Powstał ze złożenia wyników ośmiu obserwacji wykonanych między listopadem 2000 roku a kwietniem 2001.

<http://gallery.astronet.pl/index.cgi?218#zdjecia>



Magnetosfera pulsarów



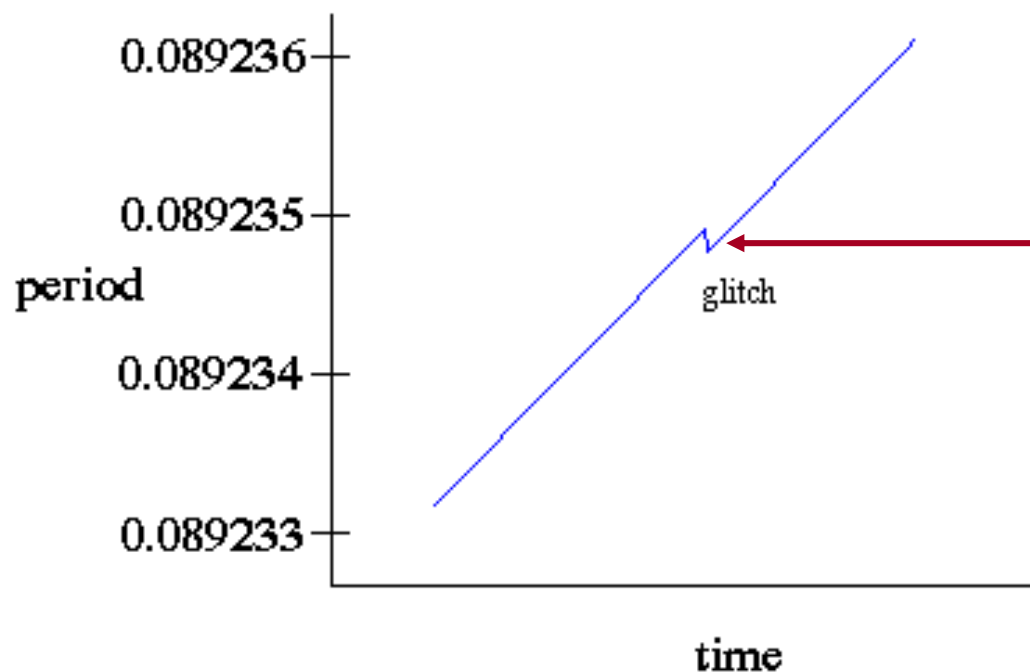
Linia światła – prędkość wirowania linii pola magnetycznego dochodzi do c . Zamknięte linie magnetyczne tylko wewnątrz cylindra.

<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/Pulsars.html>

Promieniowanie pulsarów

Wypromieniowanie energii odbywa się kosztem energii kinetycznej ruchu obrotowego pulsara. →

Prędkość kątowna maleje, a okres obrotu wydłuża się w tempie $\Delta T/T = 10^{-15}$.



Systematyczne wzrastanie okresu czasami zakłóca nagłe zmniejszenie jego wartości.

Promieniowanie pulsarów

Glitch - nagłe skrócenie okresu rotacyjnego

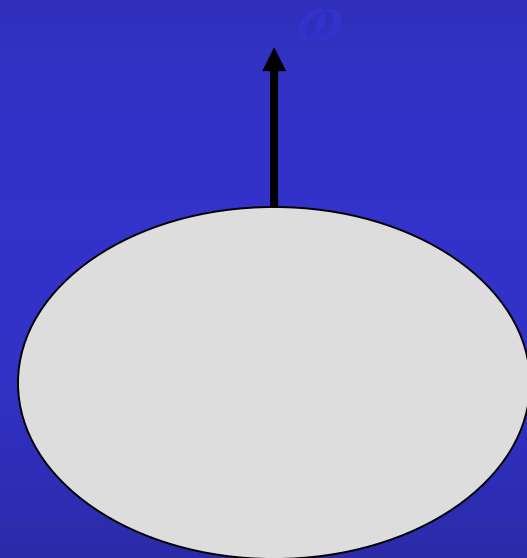
Prędkość kątowa krystalicznej skorupy zmniejsza się na skutek straty energii przez promieniowanie, podczas gdy nadciężkie jądro gwiazdy neutronowej wiruje ze stałą prędkością (brak lepkości).

Czasem nadciężkie jądro wchodzi w kontakt ze skorupą, powodując jej przyspieszenie.

Promieniowanie pulsarów

Inna hipoteza:

Nadciekłe jądro gwiazdy neutronowej, które w wyniku szybkiej rotacji jest eliptyczne, otoczone jest krystaliczna skorupą.



Promieniowanie pulsarów

Pulsar systematycznie
spowalnia swoją rotację



Zmniejsza się eliptyczność jądra
i krystaliczna skorupa traci
podtrzymujące ją podłoże.

Skorupa co jakiś czas pęka, załamuje się i opada na jądro.

Promień gwiazdy
neutronowej maleje



Maleje moment bezwładności
i wzrasta prędkość kątowa

Zmniejszenie okresu o jedną milionową część odpowiada zmniejszeniu się pulsara o jedną dziesiątą milimetra. Gdyby pulsara powiększyć do wielkości Ziemi, oznaczałoby to, że w wyniku trzęsienia Ziemi jej powierzchnia nagle opadłaby wszędzie o jeden metr.



Pulsary

Problemy do wyjaśnienia:

Zasada zachowania momentu pędu nie tłumaczy tak szybkiego ruchu obrotowego pulsarów.

Rachunki wykazują, że w ten sposób można uzyskać okresy rotacyjne rzędu 10 sekund

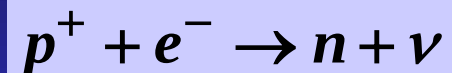
Dlaczego pulsar tak szybko wiruje?

Prędkości pulsarów są znacznie większe niż prędkości gwiazd. Nierzadko dochodzą do kilkuset kilometrów na sekundę, czasami przekraczając barierę 1000 km/s.

Co nadało im tak wielką prędkość?

Pulsary

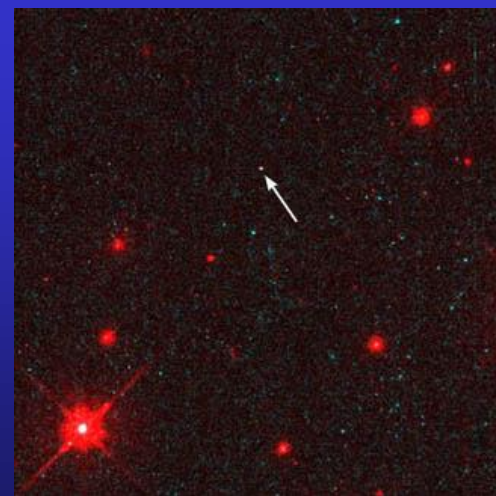
Podczas wybuchu supernowej, który poprzedza uformowanie gwiazdy neutronowej (pulsara), uwalniają się neutrina.



Strumień neutrin unoszący znaczne ilości energii, pędu i momentu pędu emitowany jest zazwyczaj niesymetrycznie.

„*Silnik odrzutowy*” neutrin nadaje gwiazdzie wielkie prędkości liniowe i kątowe.

Gwiazda neutronowa na zdjęciu z teleskopu Hubble’a odległa od Ziemi o 400 lat świetlnych. Temperatura powierzchni: 700 000 K



Pulsary

Para grawitacyjnie
związanych pulsarów.

Artystyczna wizja dwóch
pulsarów o okresach 23 ms i
2,8 s oddalonych od nas o
2000 lat świetlnych: PSR
J0737-3039A i PSR J0737-
3039B. Oba pulsary okrążają
się nawzajem z okresem 2,4 h.

Test OTW – pulsary zbliżają
się do siebie o 7 mm na dzień.

Odkrycie dwugwiazdnego systemu, oznaczonego PSR J0737-3039, zostało ogłoszone w 2003 roku przez międzynarodowy zespół naukowców z Włoch, Australii, Wielkiej Brytanii i USA.

Układy planetarne wokół pulsarów

Polski astronom Aleksander Wolszczan
odkrył wiele pulsarów.

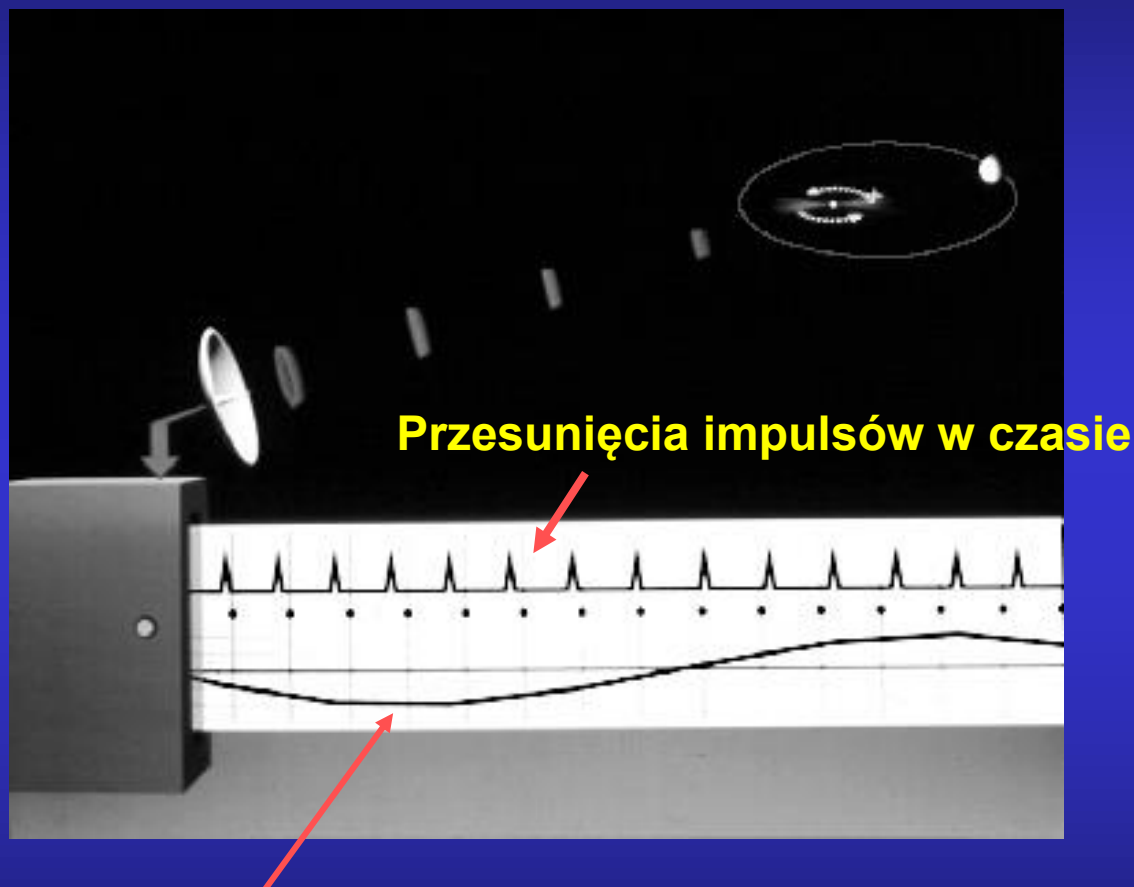
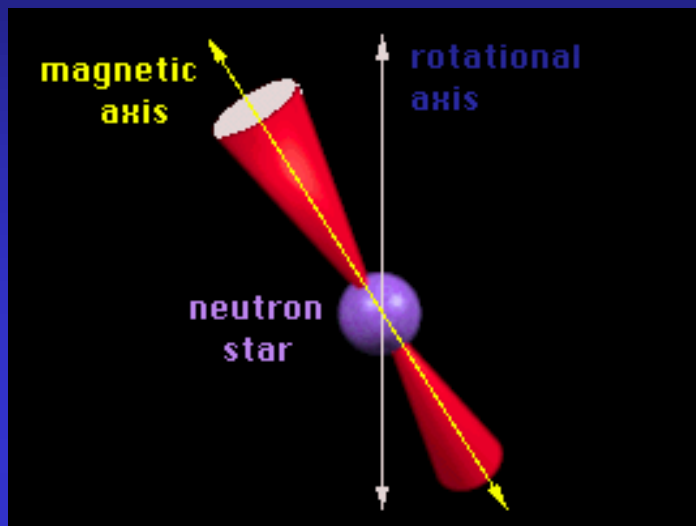


Najsłynniejszym jego odkryciem jest układ planetarny
wokół pulsara PSR 1957+12

Pulsar ten wykazywał regularne odstępstwa mierzonych
czasów impulsów od czasów przewidywanych dla tego
pulsara.

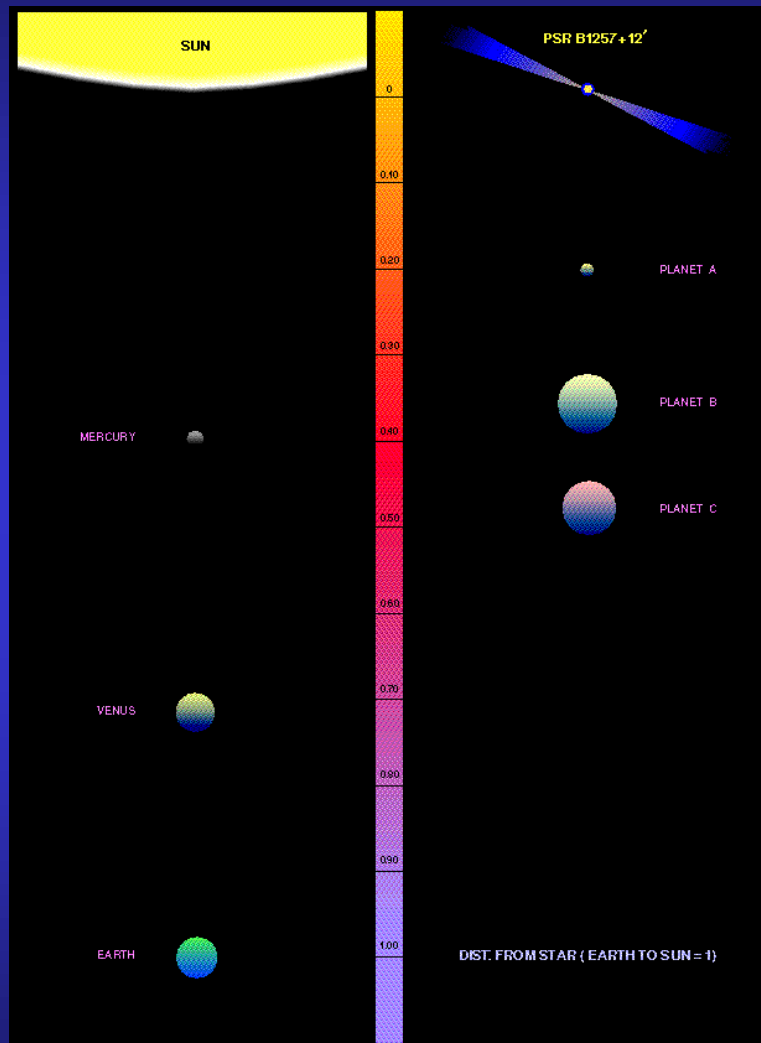
Odstępstwa te dały się wyjaśnić istnieniem co najmniej
trzech ciał o masach planetarnych orbitujących wokół
tego pulsara.

Układy planetarne wokół pulsarów



Zmiany składowej radialnej prędkości planety

Układy planetarne wokół pulsarów



Porównanie rozmiarów i odległości Słońca i jego trzech pierwszych planet z rozmiarami i odległościami pulsara PSR 1957+12 i trzema planetami odkrytymi przez Wolszczana.

Uwaga! Rozmiary i odległości nie są w jednakowej skali.

Planety nie mogły przetrwać wybuchu supernowej!

Dysk protoplanetarny wokół pulsara

Kosmiczny teleskop Spitzera (podczerwień) odkrył dysk protoplanetarny krążący wokół pulsara 4U0142+61 odległego od Ziemi o 13 tys. lat świetlnych w konstelacji Kasjopei.

Nature, 6.04.2006

Dysk ma promień około 1 miliona mil i zawiera materiał o masie około 10 mas Ziemi.

Następne pokolenie planet.



Pulsary

Polski wkład w badaniach pulsarów

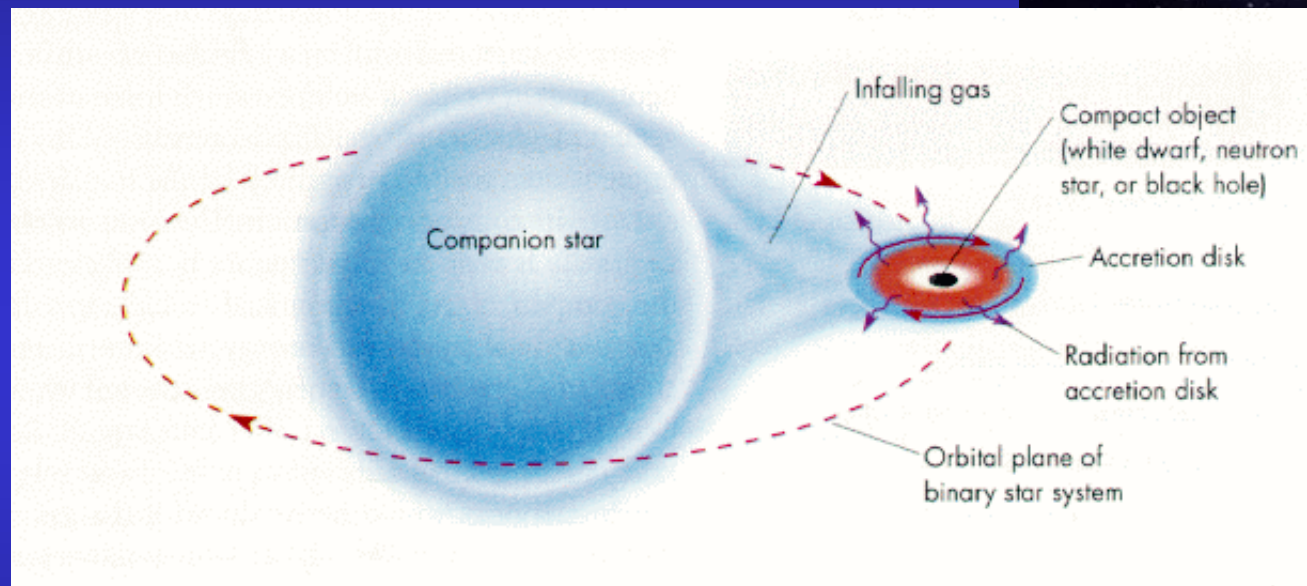
W Toruniu zbudowany został, jeden z najwyższych w Europie, 32-metrowy radioteleskop w Katedrze Radioastronomii Uniwersytetu Toruńskiego.



Dzięki wysiłkom profesorów Wolszczana, Kusa, Demiańskiego i Gila, radioteleskop toruński został wyposażony w tzw. Maszynę Pulsarową, czyli urządzenie pozwalające na obserwację pulsarów



Układy podwójne



Często gwiazdy neutronowe występują w układach podwójnych. Gaz z pobliskiego sąsiada może opadać na gwiazdę neutronową, przyciągany przez jej silne pole grawitacyjne. Gaz opada po spirali, w środku której znajduje się gwiazda neutronowa. Podczas opadania gaz tworzy dysk akrecyjny.

Układy podwójne

Podwójny układ z gwiazdą o masie mniejszej od masy Słońca.

**Oddziaływanie grawitacyjne gwiazdy neutronowej
większe niż towarzysza**

Przepływ materii z towarzysza do pulsara

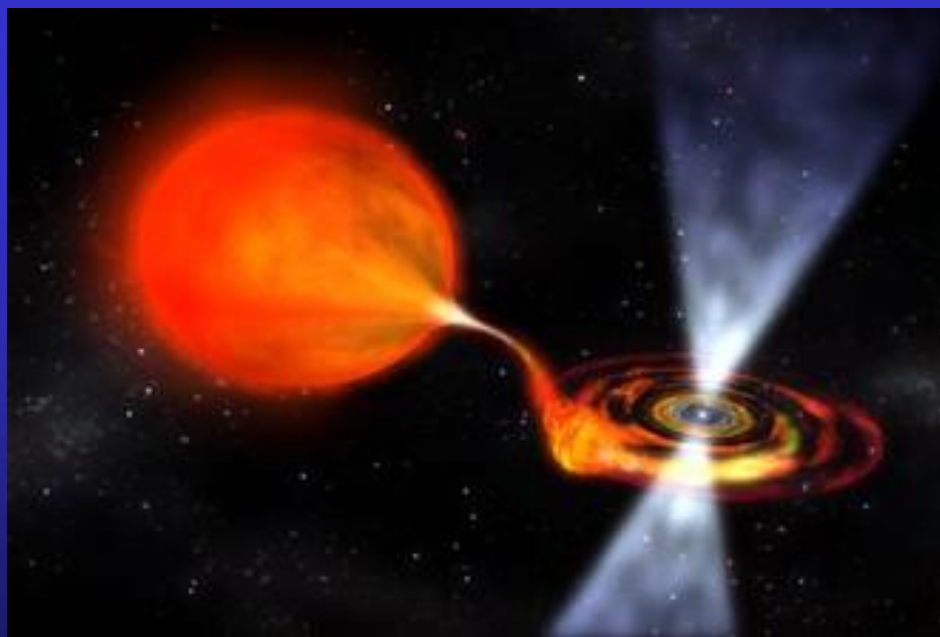
**Materia przyciągana przez gwiazdę
neutronową ma duży moment pędu.**

**Powstaje pierścień złożony z szybko
rotującej materii – dysk akrecyjny**

**Gwiazda neutronowa oddziałuje przez swoje pole magnetyczne z
krążącym pierścieniem co powoduje zwiększenie jej częstotliwości
obrotów – pulsary milisekundowe.**

Pulsary milisekundowe

Pulsary milisekundowe to bardzo szybko rotujące (obracające się częściej niż 100 razy na sekundę) gwiazdy neutronowe rozkręcone przez akrecję materii z towarzysza, zwykłej gwiazdy w procesie tzw. „recyclingu”



Wizja artystyczna obiektu Terzan 5 ad -
najszybszego znanego pulsara
milisekundowego, o częstotliwości 716 Hz.
Zródło ilustracji: NASA.

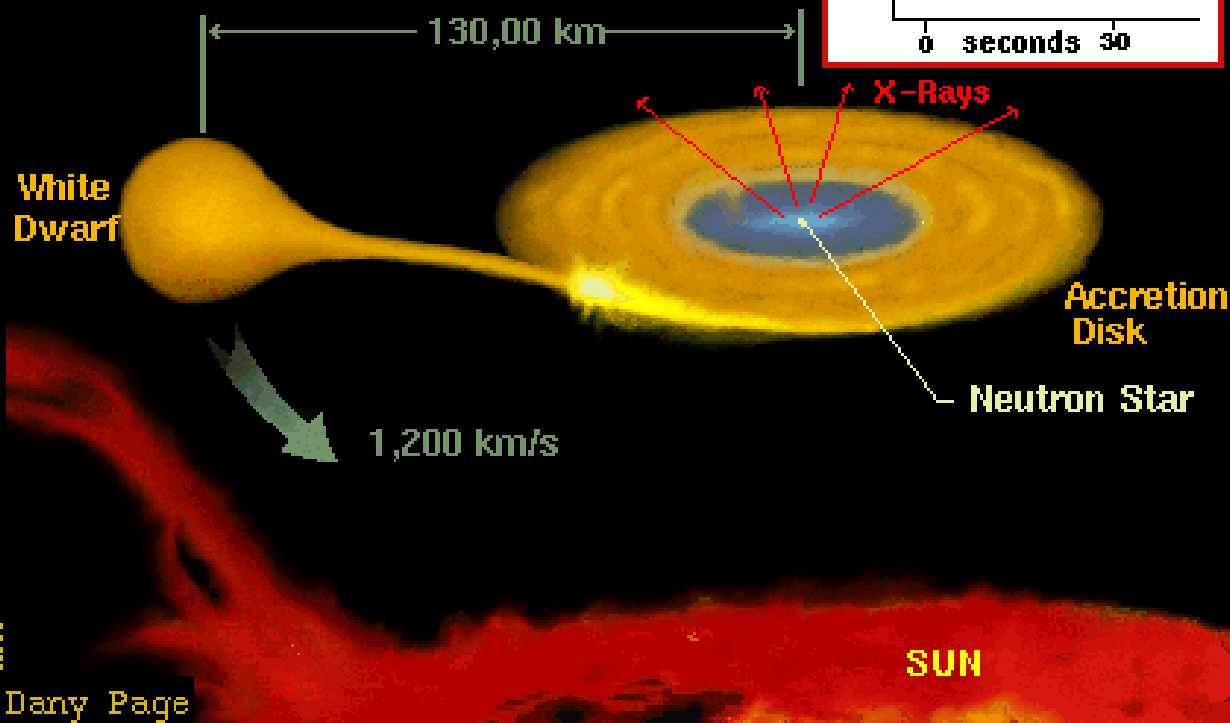
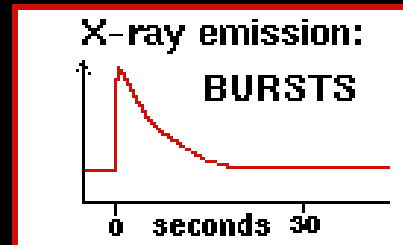
Układy podwójne

A Low Mass X-Ray Binary: 4U 1820-30

Wybuchy promieniowania X



Hel i wodór pochodzący z towarzysza odkłada się w warstwie, której gęstość rośnie. W pewnym momencie rozpoczyna się gwałtowna synteza jądrowa. Wybuchy te trwają zazwyczaj od kilku sekund do kilku minut.



Materia w pierścieniu powoli opada w stronę powierzchni pulsara. W wyniku tego podgrzewa się i zaczyna emitować promieniowanie rentgenowskie.

Układy podwójne

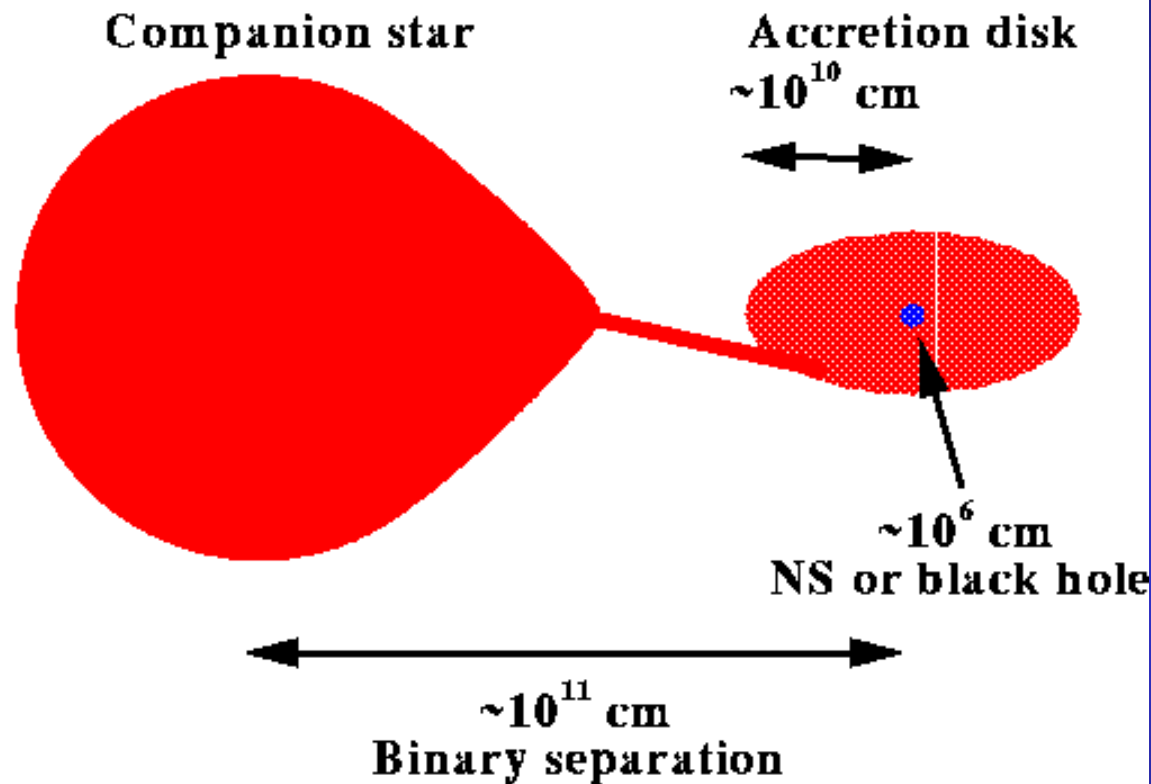
Podwójny układ z gwiazdą o masie większej od 10 mas Słońca.

Wielka gwiazda charakteryzuje się silnym wiatrem słonecznym.

Przeptywająca materia nie ma dużego momentu pędu.

Pozwala to na łatwe opadanie na powierzchnię pulsara. W związku z dużym polem magnetycznym pulsara dzieje się to przede wszystkim na biegunach magnetycznych. Materia opadając ogrzewa się i zaczyna emitować promieniowanie rentgenowskie.

Accreting neutron star or black hole

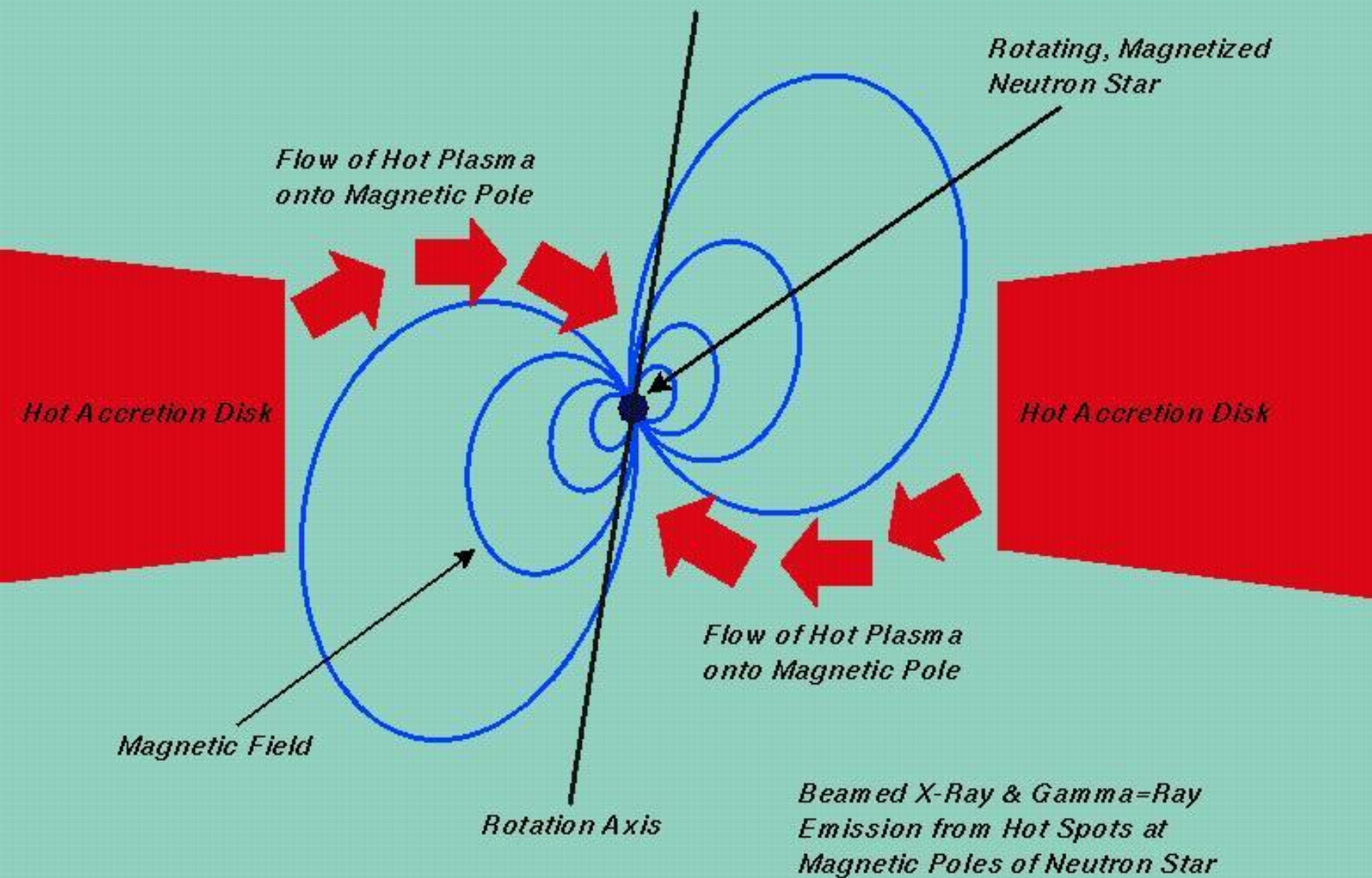


Luminosity $\sim 10^{36} - 10^{38} \text{ erg s}^{-1} = 200 - 50,000 L_{\text{sun}}$

Temperature of disk $\sim 10^7 \text{ K} \Rightarrow$ primarily X-rays



Accretion Geometry III



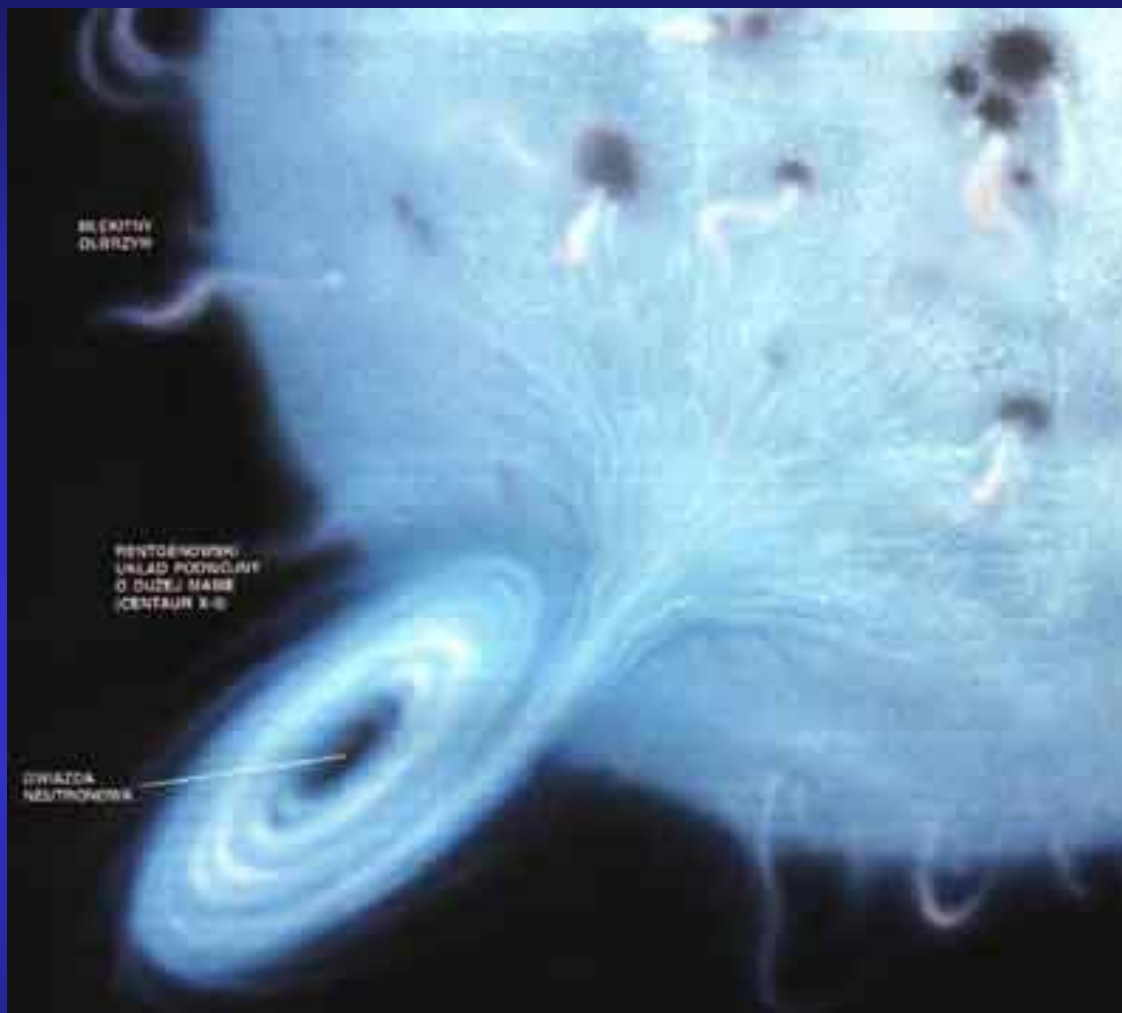
Układy podwójne



Akrecja na gwiazdę neutronową. Materia opadająca na gwiazdę w okolicach biegunów wytwarza duże ilości energii. W przestrzeń zostaje wysłane silne promieniowanie X.

Świat Nauki, styczeń 1994

Układy podwójne



Centaur X-3. Rentgenowski układ podwójny gwiazdy neutronowej i błękitnej gwiazdy o masie 10 - 40 mas Słońca. *Świat Nauki*, styczeń 1994



Animacja przedstawia wybuch gwiazdy neutronowej. Do wybuchu takiego dochodzi, gdy materia opadająca z gwiazdy towarzysza odkłada się na powierzchni gwiazdy. Kiedy warstwa tego materiału przekroczy granicę krytyczną, rozpoczyna się gwałtowna reakcja termojądrowa.

<http://gallery.astronet.pl/index.cgi?218#zdjecia>