

# Masywne gwiazdy neutronowe – konsekwencje dla teorii

Sławomir Stachniewicz, IF PK

## 1. Gwiazdy neutronowe

Gwiazdy neutronowe są obiektami, dla których głównym źródłem ciśnienia (a zarazem ich stabilności) jest nim ciśnienie **materii jądrowej**. Ich istnienie zapostulował w 1934 r. Fritz Zwicky a szczegóły doprecyzowali Landau (1938) oraz Baade i Zwicky (1939). Pierwszy taki obiekt zaobserwowano w 1967 r., kiedy Jocelyn Bell Burnell z uniwersytetu w Cambridge, asystentka Anthony'ego Hewisha, odkryła szybko obracający się obiekt o gigantycznym polu magnetycznym.

### Parametry gwiazd neutronowych:

- ⇒ masy powyżej  $1.17 M_{\odot}$  (górną granicę co jakiś czas jest przesuwana)
- ⇒ promienie w granicach 9-15 km

- ⇒ temperatury powierzchniowe na początku rzędu  $10^{10}$  K ale w ciągu miliona lat prawdopodobnie spadają o 5-6 rzędów wielkości
- ⇒ pola magnetyczne: pulsary milisekundowe  $10^8$ - $10^{10}$  Gs, zwykłe pulsary  $10^{11}$ - $10^{13}$  Gs, magnetary powyżej  $10^{14}$  Gs

Gwiazdy neutronowe stanowią ostatni etap ewolucji gwiazd o masach powyżej  $8 M_{\odot}$  i powstają podczas wybuchu supernowej typu II lub Ib, ewentualnie kolapsu białego karła (supernowa typu Ia) w układzie podwójnym.

## 2. Fizyka gwiazd neutronowych

Do opisu tak silnie związanego obiektu nie wystarcza gravitacja newtonowska – trzeba uwzględnić efekty [Ogólnej Teorii Względności](#):

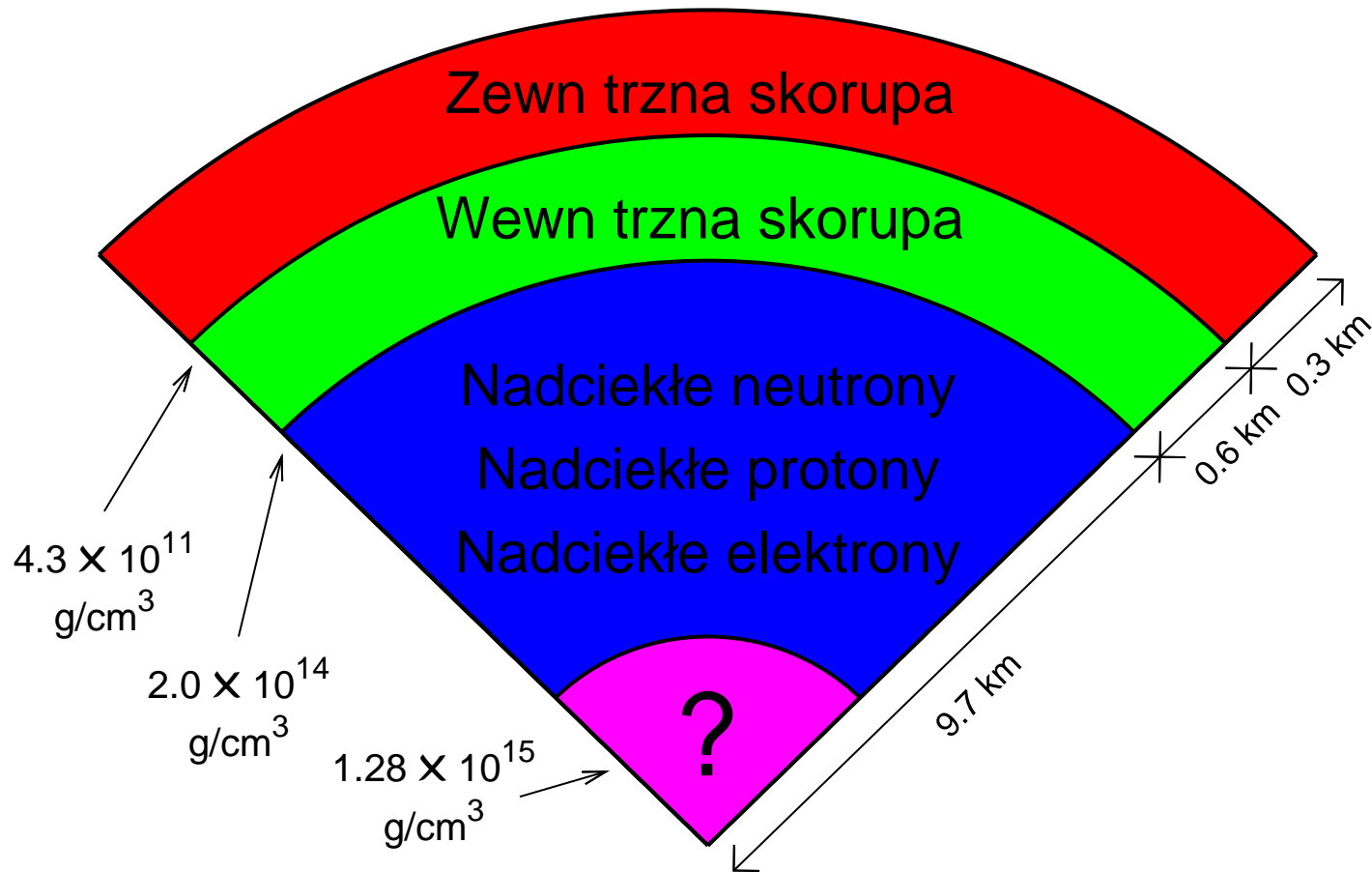
$$\frac{dP(r)}{dr} = - \frac{G(\rho(r) + \frac{P(r)}{c^2})(m(r) + \frac{4\pi r^3 P(r)}{c^2})}{r^2(1 - \frac{2Gm(r)}{c^2 r})}$$

Jak się uważa, gwiazdy neutronowe mają następującą strukturę:

⇒ Powierzchnia ( $\rho \leq 10^6 \text{ g/cm}^3$ ) – obszar, w którym mają znaczenie temperatury i pola magnetyczne.

- ⇒ Zewnętrzna skorupa ( $10^6 \leq \rho \leq 4.3 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$ ) – sieć krystaliczna ciężkich jąder, zdegenerowany gaz elektronowy.
- ⇒ Wewnętrzna skorupa ( $4.3 \cdot 10^{11} \leq \rho \leq (2 - 2.4) \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ) – sieć krystaliczna jąder z domieszką neutronów, nadciekłego gazu neutronowego i gazu elektronowego.
- ⇒ Ciecz neutronowa ( $(2 - 2.4) \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq \rho_{rdz}$ ) – głównie neutrony z domieszką protonów i elektronów.
- ⇒ Rdzeń? Być może powyżej pewnej krytycznej wartości  $\rho_{rdz}$  następuje przejście fazowe z cieczy neutronowej do np. materii kwarkowej lub kondensatu pionów.

# Przekroje gwiazd neutronowych.



### 3. Równanie stanu i masa maksymalna

Równanie stanu materii jądrowej nie jest znane, czyli struktura gwiazd neutronowych zawiera wiele znaków zapytania. Znane są tylko wartości:

⇒ gęstości saturacji materii jądrowej  $n_0 \approx 2.7 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$

⇒ energii symetrii  $E_S \approx 30 \text{ MeV}$

które pozwalają dać pewne ograniczenia na równanie stanu.

W praktyce mamy różne klasy modeli. Niektóre są oparte na oddziaływaniach efektywnych, takich jak siły Skyrme'a czy oddziaływanie Myyera i Świąteckiego. Inne są oparte na potencjałach fenomenologicznych, takich jak: potencjał miękkiego rdzenia Reida, potencjał  $v_{14}$  Urbana, potencjał  $v_{14}$  Argonne, czy potencjał Friedmana-Pandharipande-Ravenhalla (FPR).

Modele różnią się przewidywaną strukturą wewnętrzną (np. zależnością gęstości i ciśnienia od odległości od środka), ale to akurat byłoby trudne do sprawdzenia. Na szczęście, są również łatwiej sprawdzalne przewidywania: **promienie** i **masy maksymalne** gwiazd neutronowych, dzięki czemu można odrzucić przynajmniej niektóre z modeli.

Przy gęstości przekraczającej trzy gęstości saturacji rozważa się możliwość występowania nowych stopni swobody w równaniach struktury:

- ⇒ cięższe bariony (hiperony)
- ⇒ kondensaty pól mezonowych (pionów, kaonów)
- ⇒ jeszcze wyższe gęstości: być może przejście fazowe do materii kwarkowej (kwarki  $u$ ,  $d$  i  $s$ ).

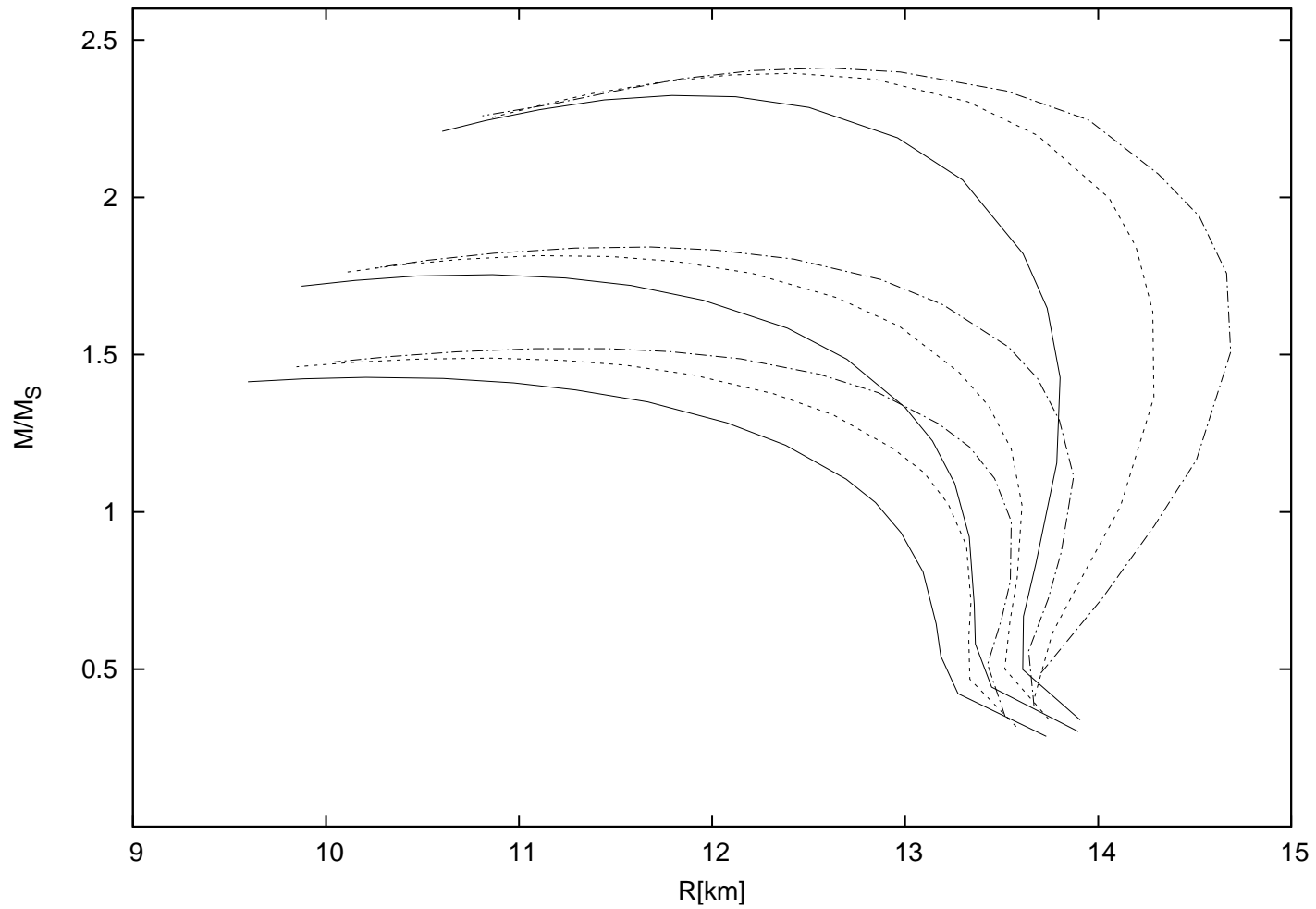


## 4. Przykładowe modele gwiazd neutronowych

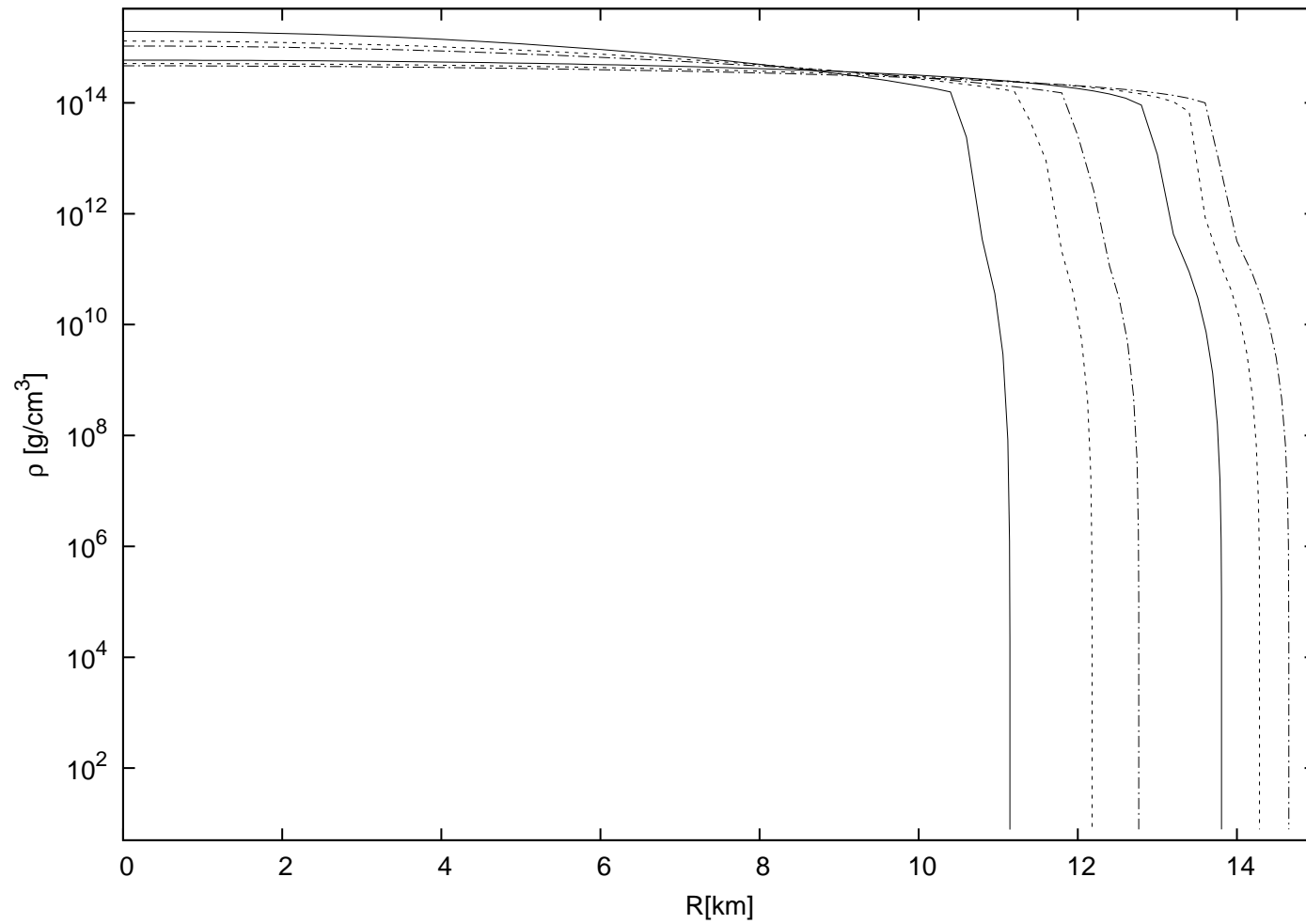
W zależności od przyjętego równania stanu otrzymuje się różne zależności między masą i promieniem oraz różne przekroje gwiazd neutronowych. Obliczenia zaczyna się od środka przy zadanej gęstości centralnej a kończy wtedy, kiedy gęstość materii spadnie do odpowiednio niskich wartości.

Poniżej przedstawiam przykładowe wyniki dla wybranych starszych modeli gwiazd neutronowych. Wzrostowi gęstości centralnej zwykle towarzyszy spadek promienia i wzrost masy. W pewnym momencie masa osiąga wartość maksymalną a później spada – modele stają się niestabilne i kolapsują (prawdopodobnie) do czarnej dziury.

# Masy i promienie gwiazd neutronowych.



# Przekroje gwiazd neutronowych.



## 5. Nowe oszacowania na masę maksymalną

We wrześniu świat obiegła informacja o sensacyjnej masie pulsara. H.T. Cromartie i inni donieśli o wynikach pomiarów masy pulsara milisekundowego MSP J0740+6620. Połączenie danych z 12,5 lat obserwacji NANOGrav z obserwacjami Green Bank Telescope pozwoliło oszacować jego masę na  $2.14 M_{\odot}$  z odchyleniem standardowym ok.  $0.1 M_{\odot}$ . To oznacza, że prawdopodobnie jest to najbardziej masywna spośród znanych gwiazd neutronowych.

Jest to o tyle interesujące, że przez długi czas uważano, że masy gwiazd neutronowych raczej **nie powinny przekraczać  $1.5 M_{\odot}$**  a **masę  $1.4 M_{\odot}$  uznano za kanoniczną**. Tymczasem

w ostatnich latach obserwujemy kolejne doniesienia o odkryciu masywnych pulsarów:

⇒ 2010, J1614-2230,  $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$  (w 2016 poprawiono na  $1.928 \pm 0.017 M_{\odot}$ )

⇒ 2013, J0348+0432,  $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$

⇒ 2017, LIGO wykrył podwójną GN, jedna może mieć masę do  $2.17 M_{\odot}$

Było też doniesienie z 2018 r. o spektroskopowych i fotometrycznych obserwacjach sugerujących istnienie gwiazd neutronowych o masach powyżej  $2.4 M_{\odot}$ .

## 6. Wnioski

O ile pierwsze doniesienie o gwiazdzie neutronowej o masie ok.  $2 M_{\odot}$  traktowałem z pewną nieufnością, teraz znamy ich więcej. Konsekwencje są przynajmniej dwie:

- ⇒ znacznie silniejsze ograniczenia na równania stanu materii jądrowej
- ⇒ fakt, że większość gwiazd neutronowych ma niższe masy, jest raczej konsekwencją sposobu ich powstawania niż równania stanu.

Jeśli potwierdzą się doniesienia o masach przekraczających  $2.4 M_{\odot}$ , oznaczałoby to poważne problemy dla teorii: konieczność naciągania tzw. **realistycznych** równań stanu lub sięgnięcia

po te **mniej realistyczne** (np. z prędkościami dźwięku przekraczającymi prędkość światła w próżni).