

Najbardziej zwarte  
obiekty we Wszechświecie

## 1. Ciśnienie a stabilność

Dla stabilności dowolnego obiektu na tyle masywnego, że siły grawitacji nie pozwalają mu się rozpaść, kluczową kwestią jest **źródło ciśnienia**. Jeśli weźmiemy pod uwagę równanie równowagi hydrostatycznej

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G\rho(r)m(r)}{r^2}$$

to okaże się, że warunkiem stabilności obiektu jest zaistnienie dostatecznie dużego **gradientu ciśnienia**  $dP/dr$ . A żeby był gradient ciśnienia, musi być jakieś jego źródło.

W przypadku obiektów astrofizycznych istnieje szeroki wybór źródeł ciśnienia. Są to:

- ⇒ siły między cząsteczkami, sieciami krystalicznymi itp. (planety)
- ⇒ ciśnienie gazu doskonałego (gazowe olbrzymy, brązowe karły, gwiazdy, atmosfery)
- ⇒ ciśnienie promieniowania (gorętsze gwiazdy)
- ⇒ zakaz Pauliego czyli ciśnienie zdegenerowanego gazu elektronowego (białe karły).

Przy opisie powyższych obiektów można stosować zwykłą mechanikę newtonowską. Ale co się dzieje jeśli siły grawitacji są na tyle duże, że żadne wymienione źródło ciśnienia nie jest w stanie powstrzymać kolapsu?

Wśród tych obiektów najsilniej związane są białe karły. Problem w tym, że istnieje górna granica masy (tzw. **granica Chandrasekhara**, ok. **1.44 M<sub>⊙</sub>**), powyżej której nawet zakaz Pauliego nie jest w stanie powstrzymać kolapsu. Czy istnieje inne źródło ciśnienia, które może powstrzymać dalszy kolaps?

## 2. Gwiazdy neutronowe

Okazuje się, że takie źródło istnieje – jest nim ciśnienie tzw. **materii jądrowej** a obiekty tego typu noszą nazwę **gwiazd neutronowych**.

Jocelyn Bell Burnell z uniwersytetu w Cambridge, asystentka Anthony'ego Hewisha, odkryła w 1967 r. szybko obracający się obiekt o gigantycznym polu magnetycznym. Okazało się, że była to gwiazda neutronowa, których istnienie zapostulował w 1934 r. Fritz Zwicky a szczegóły doprecyzowali Landau (1938) oraz Baade i Zwicky (1939).

**Parametry gwiazd neutronowych:**

⇒ masy w przedziale  $1.17-1.97 M_{\odot}$

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

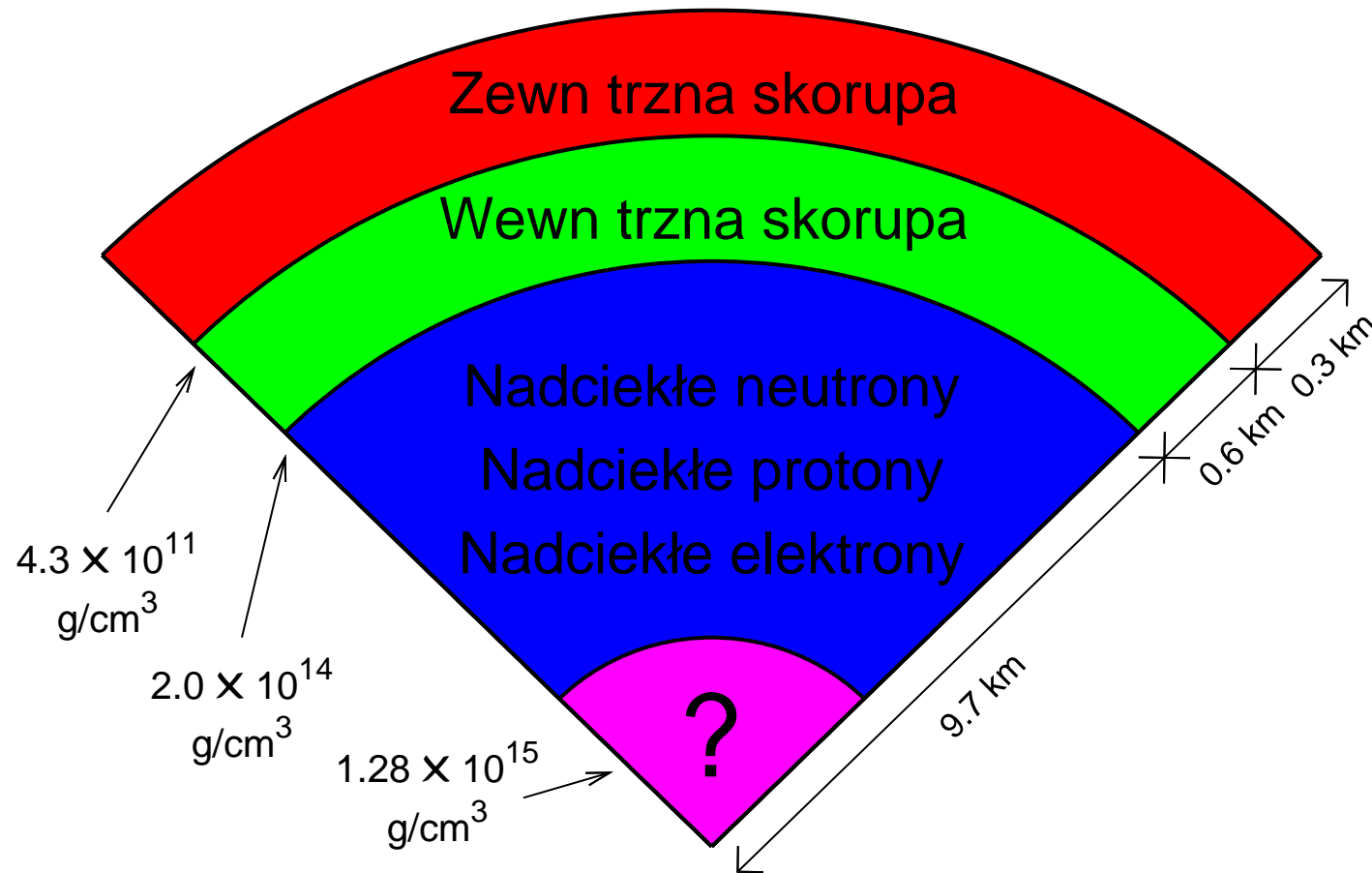
$$\frac{dP(r)}{dr} = - \frac{G(\rho(r) + \frac{P(r)}{c^2})(m(r) + \frac{4\pi r^3 P(r)}{c^2})}{r^2(1 - \frac{2Gm(r)}{c^2 r})}$$

### 3. Struktura gwiazdy neutronowych

- ⇒ 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.



Struktura gwiazdy neutronowej.

## 4. 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  $s$ ).

## 5. Czarne dziury

Wszystkie równania stanu materii jądrowej przewidują istnienie masy maksymalnej, powyżej której ciśnienie materii jądrowej nie mogłoby powstrzymać kolapsu. Nie jest znane żadne źródło ciśnienia, które mogłoby powstrzymać obiektu o takiej lub większej masie (co nie oznacza, że takowe na pewno nie istnieje). Tak obiekt zapadałby się, aż w końcu powstałaby **czarna dziura**. Przyjmuje się, że wszystkie zwarte objekty o masach powyżej, powiedzmy,  $3 M_{\odot}$ , muszą być czarnymi dziurami.

Obiekty podejrzewane o bycie czarnymi dziurami mają zwykłe masy:

⇒ kilka-kilkanaście  $M_{\odot}$ : **gwiazdne czarne dziury**

⇒ powyżej  $10^5 M_{\odot}$ : **supermasywne czarne dziury**.

Być może istnieją czarne dziury o masach pośrednich.

Istnienie czarnych dziur było po raz pierwszy rozważane w XVIII w. przez Michella i Laplace'a. Miałyby to być obiekty, dla których prędkość ucieczki byłaby większa od prędkości światła w próżni, czyli obiekty których promień

$$R < r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

Okazuje się, że wskutek zbiegu okoliczności ta *klasyczna* wartość jest zgodna z wartością przewidywaną na podstawie Ogólnej Teorii Względności w tzw. [rozwiązaniu Schwarzschilda](#). Promieniowanie i informacje nie mogą się wydostać na zewnątrz.

Czarne dziury mogą być wykrywane wyłącznie w sposób pośredni, dzięki istnieniu ich pola grawitacyjnego.

- ⇒ Czarne dziury mogą wyraźnie zaburzać ruch sąsiednich obiektów (np. supermasywne czarne dziury w centrach galaktyk).
- ⇒ Wokół czarnych dziur mogą się formować dyski akrecyjne.

## 6. Osobliwości i promieniowanie Hawkinga

Rozwiązanie Schwarzschilda przewiduje istnienie dwóch osobliwości: dla odległości równej promieniowi grawitacyjnemu oraz w środku. Ta pierwsza jest osobliwością pozorną i wynika tylko ze stosowanego układu współrzędnych, ta druga jest osobliwością rzeczywistą i tam załamuje się znana fizyka. Krzywizna czasoprzestrzeni staje się nieskończona a pole grawitacyjne rośnie do nieskończenie wielkich wartości. Pozostaje mieć nadzieję, że problem zostanie rozwiązany przy pomocy kwantowej teorii grawitacji (o ile kiedykolwiek powstanie).

Czarne dziury mogą emitować własne promieniowanie (tzw. [parowanie czarnych dziur](#)). W 1972 r. Bekenstein oszacował entropię czarnej dziury a 2 lata później Hawking (z początku

nastawiony bardzo sceptycznie) tę teorię rozwinął. Otrzymał wzór na entropię czarnej dziury

$$S = \frac{k_B c^3 A}{4\hbar G}$$

gdzie  $A$  jest powierzchnią horyzontu zdarzeń, oraz temperaturę promieniowania czarnej dziury

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B M}$$

Wniosek: czarne dziury mniej masywne powinny *parować* szybciej.



## 7. Podsumowanie

- ⇒ Najbardziej zwarte obiekty we Wszechświecie (takie, dla których trzeba używać OTW) to gwiazdy neutronowe i czarne dziury.
- ⇒ Gwiazdy neutronowe mają masy rzędu  $1.4 M_{\odot}$ , promienie rzędu 10 km i olbrzymie pola magnetyczne.
- ⇒ Czarne dziury prawdopodobnie mają masy rzędu  $10 M_{\odot}$  (gwiazdne) i powyżej  $10^5 M_{\odot}$  (supermasywne).
- ⇒ Czarne dziury można wykryć wyłącznie pośrednio.
- ⇒ Fizyka tych obiektów nie jest do końca poznana, zwłaszcza w przypadku czarnych dziur jest dużo więcej znaków zapytania niż pewników.