

Supernowe czarnych karłów

Black Dwarf Supernovae

Janusz Osarczuk

Abstrakt. Białe karły nie są ostatnim stadium ewolucji gwiazd mało- lub średnio masywnych. Kiedyś wypromieniują całe swoje zapasy energii i stając się zimnymi i ciemnymi ciałami, zamieniają się w czarne karły. Nie oznacza to jednak, że przestaną być interesującymi obiektami.

Słowa kluczowe: gęsta materia, supernowe, białe karły, kosmologia

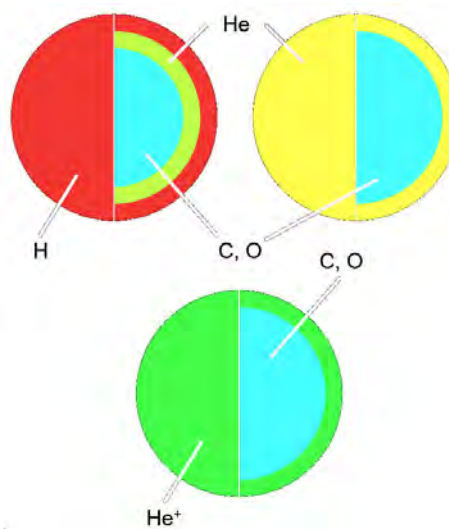
Abstract. White dwarfs are not the final stage in the evolution of low- or medium-mass stars. One day they will radiate all their energy reserves and become cold and dark bodies, they will turn into black dwarfs. However, it does not mean that they will stop being interesting objects.

Keywords: dense matter, supernovae, white dwarfs, cosmology

1. Białe karły

Zgodnie z teorią ewolucji gwiazd obiekty, które nie są wystarczająco masywne, aby zakończyć swój żywot jako gwiazdy neutronowe czy czarne dziury (czyli gwiazdy o początkowej masie maksymalnej do ok. $8 M_{\odot}$, gdzie M_{\odot} oznacza masę Słońca) po zużyciu paliwa odrzucają swoje zewnętrzne warstwy (atmosferyczne) i pozostaje z nich jądro o gęstości $10^4 \div 10^9 \text{ g/cm}^3$. W przypadku gwiazd o początkowej małej masie ($0,08 \div 0,5 M_{\odot}$) jądro składa się z helu, natomiast dla gwiazd większych ($0,5 \div 8 M_{\odot}$) w jądrze znajduje się głównie węgiel i tlen (99% masy), patrz rys. 1, oraz ewentualnie domieszki neonu i magnezu. Białe karły zyskały swą nazwę ze względu na barwę wysyłanego promieniowania. Ich temperatura powierzchniowa waha się od ok. 3000 K (np. dla białego karła w układzie podwójnym PSR J2222-013) do ok. 200000 K (np. dla białego karła KPD 0005+5106).

Białe karły są obiektami stabilnymi. Jednakże ich budowa, a co za tym idzie wysoka gęstość, wymaga innego mechanizmu zachowania równowagi hydrostatycznej, niż ma to miejsce w gwiazdach ciągu głównego czy olbrzymach, w których to gradient ciśnienia całkowitego jest czynnikiem przeciwstawiającym się grawitacji. Białe karły, pozbawione możliwości reakcji termojądrowych, nie zapadają się pod własnym ciężarem dzięki ciśnieniu tworzących je elektronów. Znajdują się one w stanie zdegenerowanym (z wyjątkiem cienkiej warstwy powierzchniowej), a ciśnienie tego fermionowego gazu jest proporcjonalne do gęstości materii w potęgde $5/3$ (dla degeneracji nierelatywistycznej w przypadku mniej masywnych gwiazd) lub $4/3$ (dla degeneracji relatywistycznej w przypadku gwiazd o większej masie).



Rys. 1. Typy białych karłów; H – wodór, He – hel, He⁺ – hel zjonizowany, C – węgiel, O – tlen

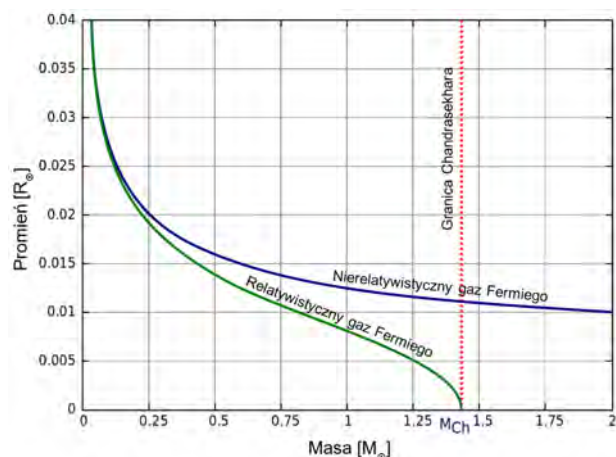
[Rysunek został wykonany na podstawie ilustracji z Wikipedii: https://pl.wikipedia.org/wiki/Bia%C5%82y_karze%C5%82#/media/Plik:White_dwarf_types.svg, dostęp: 27.03.2023]

Istotną cechą tych gwiazd jest tzw. zależność masa-promień, którą można w przybliżeniu przedstawić następująco: $R \sim M^{-1/3}$. Oznacza to, iż ze wzrostem masy gwiazdy jej promień maleje, co przedstawia rys. 2.

Zauważmy, iż zielona krzywa urywa się przy wartości 1,44. Jest to tzw. granica Chandrasekhara, przekroczenie której możliwe jest w dwóch przypadkach:

- 1) Gdy biały karzeł akreuje materię z sąsiedniej gwiazdy ciągu głównego lub olbrzyma (model single-degenerate).
- 2) W wyniku zderzenia dwóch białych karłów (model

double-degenerate).



Rys. 2. Zależność masa-promień dla białych karłów; M_{\odot} – masa Słońca, R_{\odot} – promień Słońca
[Źródło: Wikipedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Bia%C5%82y_karze%C5%82#/media/Plik:ChandrasekharLimitGraph.svg, dostęp: 20.02.2023]

2. Degeneracja materii

Materia zdegenerowana jest bardzo gęstym stanem materii fermionowej podlegającej zasadzie wykluczenia Pauliego, dzięki której materia, złożona z elektronów, protonów, neutronów lub innych fermionów, wywiera ciśnienie oprócz lub zamiast ciśnienia termicznego. Ten rodzaj materii występuje nie tylko w białych karłach, ale także w gwiazdach neutronowych (oraz w hipotetycznych gwiazdach kwarkowych).

Materia zdegenerowana jest zwykle przedstawiana jako idealny gaz Fermiego, czyli zbiór nieoddziałujących fermionów. Zasada wykluczenia Pauliego zapobiega zajmowaniu tego samego stanu kwantowego przez identyczne fermiony. Przy najniższej energii całkowitej wszystkie stany kwantowe o najniższej energii są wypełnione i wówczas stan ten nazywa się pełną degeneracją. To ciśnienie degeneracji pozostaje niezerowe nawet w temperaturze zera absolutnego. Dodawanie cząstek lub zmniejszanie objętości zmusza cząstki do przejścia do stanów kwantowych o wyższej energii. Ciśnienie degeneracji nie zależy od temperatury, a jedynie od gęstości fermionów.

3. Czarne karły

Białe karły stygną niczym wypalone jądrowe piece. Po długim, ale skończonym czasie ich temperatura zrówna się z temperaturą próżni kosmicznej. Przesną one wówczas świecić i staną się „kupą kosmicznego gruzu”. Fizyka klasyczna twierdzi, iż w takiej zimnej materii nic się już nie zmieni. Jednakże mechanika kwantowa ma na ten temat inne zdanie. Przewiduje ona zjawisko zwane tunelowaniem kwantowym, które może zachodzić nawet w temperaturze bliskiej zera bezwzględnego. Co prawda,

w takich warunkach jego tempo jest niesłychanie wolne, ale przecież czarny karzeł ma mnóstwo czasu. A zatem tunelowanie umożliwi reakcje jądrowe, zwane pycnonuklearnymi, które mozolnie będą przekształcać atomy czarnego karła, zamieniając je finalnie w żelazo-56 [1].

4. Reakcje pycnonuklearne

Reakcje pycnonuklearne (od greckiego *pycnos*, czyli gęsty, zwarty) zachodzą w materii o dużej gęstości, gdy jądra atomowe są „zamrożone” w strukturach sieciowych, czyli gdy elektrony ekranują jądra i jest przekroczona (tunelowana) bariera coulombowska. Taka właśnie materia charakteryzuje skorupy gwiazd neutronowych i jądra białych karłów. Reakcje pycnonuklearne w materii gwiazdy neutronowej są zdominowane przez fuzję między bardzo bogatymi w neutrony izotopami węgla, tlenu i neonu. Natomiast w białych karłach w reakcjach tych najważniejszymi składnikami są węgiel-12 i tlen-16. Warto zauważyć, iż energia wiązania jąder tlenu, neonu czy magnezu wynosi ok. 8 MeV na nukleon, a energia wiązania pierwiastków z grupy żelaza ma wartość ok. 9 MeV na nukleon. Tak więc można obliczyć, iż uwolnienie 1 MeV na każdy nukleon gwiazdy (w postaci energii oraz neutrin i pozytonów) prowadzi do utraty ok. 1‰ jej całkowitej masy [1].

5. Supernowe czarnych karłów

Konwersja materii czarnego karła niesie ze sobą poważne konsekwencje. Jak już wspomniałem, białe karły posiadają górną granicę masy, która jest wyznaczona wzorem: $M_{Ch} \approx 1,44(2Y_e)^2 M_{\odot}$, gdzie M_{Ch} jest masą Chandrasekhara, a Y_e oznacza frakcję elektronową, czyli stosunek elektronów do barionów (tj. neutronów i protonów) w materii [1]. Wartość 1,44 uzyskuje się gdy $Y_e = 0,5$, tj. gdy elektronów jest tyle samo co neutronów i protonów. Reakcje pycnonuklearne wytwarzają jednak pozytony, które doprowadzają do anihilacji elektronów. Podczas przemiany materii gwiazdy frakcja elektronowa maleje więc, co powoduje spadek ciśnienia gazu elektronowego. To z kolei oznacza obniżanie się wartości granicy Chandrasekhara przy zachowanej masie czarnego karła. W momencie gdy wartość granicznej masy stanie się mniejsza niż masa własna czarnego karła, wówczas obiekt straci swą stabilność. Następstwem takiego obrotu sprawy będzie kolaps grawitacyjny, który doprowadzi do wybuchu podobnego do dzisiejszych supernowych (ten nowy typ supernowych można więc nazwać supernowymi czarnych karłów).

W procesie transformacji materii czarnego karła, czyli zamiany w gwiazdę żelazną, frakcja elektronowa może spaść do wartości $Y_e = 0,464$ [1]. Gdy podstawimy tę liczbę do wzoru na granicę Chandrasekhara okaże

się, że maksymalna możliwa masa czarnego karła obniży się do wartości $\sim 1,24 M_{\odot}$, czyli aż ok. 14%. To dużo, ale jednocześnie to oznacza, że tylko niewielkie obiekty będą mogły przejść przez fazę supernowej. Nawet jeżeli przyjmemy, że taki los czeka tylko 1% wszystkich istniejących dzisiaj białych karłów, to i tak daje to liczbę 10^{21} możliwych eksplozji supernowych czarnych karłów! [1]

6. Struktura czarnych karłów

Wróćmy do zagadnienia związanego ze spadkiem liczby elektronów. Gdy frakcja elektronowa osiągnie wartość $Y_e = 0,464$, oznaczać to będzie transformację atomów do postaci żelaza-56. Trzeba jednak sobie uświadomić, iż przemiana ta nie następuje jednolicie w całej gwiazdzie, ale rozpoczyna się w jądrze, czyli tam gdzie materia jest najbardziej gęsta, a dopiero później postępuje w kolejnych wyższych warstwach czarnego karła. Ma to znaczący wpływ na czas konieczny do kolapsu i wybuchu gwiazdy.

Spójrzmy teraz na trzy wybrane obiekty, przedstawione w tab. 1. Ostatni wiersz pokazuje, jaka część materii gwiazdy musi zostać przetworzona na żelazo-56, aby dany obiekt przekroczył granicę Chandrasekhara. Jak widać, w przypadku cięższych czarnych karłów wystarczy przemiana w żelazo-56 tylko niewielkiej części materii jądra, natomiast lżejsze gwiazdy muszą dokonać podobnej transformacji także w swoich wyższych warstwach (gwiazda 1 musi przetworzyć ponad 600 razy więcej materii w żelazo-56 niż gwiazda 3). Im bardziej masywna jest gwiazda, tym mniej czasu potrzebuje na przemiany prowadzące do kolapsu, zatem większe czarne karły mogą szybciej wybuchnąć jako supernowe.

Gwiazda	1	2	3
M / M_{\odot}	1,17	1,27	1,35
R / R_{\oplus}	$\sim 0,34$	$\sim 0,12$	$\sim 0,04$
V_{Fe-56} / V_G	$\sim 3,93\%$	$\sim 0,17\%$	$\sim 0,0064\%$

Tab. 1. Ilość żelaza-56 potrzebna do osiągnięcia granicy Chandrasekhara; M_{\odot} – masa Słońca, R_{\oplus} – promień Ziemi, V_{Fe-56} – objętość materii przetworzonej w żelazo-56, V_G – objętość całej gwiazdy [Tabela została wykonana na podstawie danych z pracy [1]]

7. Gwiazdy żelazne

W ramach dygresji spójrzmy przez chwilę na konsekwencje reakcji pycnonuklearnych. Nie jest to bynajmniej kwestia, którą zaczęto rozważać dopiero w ostatnim czasie. „Ironizację” (ang. *iron* – żelazo – przyp.red.) materii sugerował już ponad 40 lat temu Freeman Dyson. Rozpatrywał on możliwość przemiany całej materii Wszechświata w żelazo-56 i to zarówno pierwiastków od niego lżejszych

jak i cięższych. W przypadku tych pierwszych przewidywał fuzję jądrową, natomiast tym cięższym wskazywał drogę do celu poprzez reakcje rozszczepienia jąder i emisję cząstek α . Czas, po którym utworzą się gwiazdy żelazne, oszacował na 10^{1500} lat [2]. Przewidywał również kolaps tychże obiektów do postaci gwiazd neutronowych lub do postaci czarnych dziur po okresie $10^{10^{76}}$ lat [2]. Gwiazdy żelazne miałyby zatem być ostatnim etapem transformacji pierwiastków.

8. Obserwacje

Na koniec zastanówmy się, czy detekcja czarnych karłów jest możliwa. Białe karły są obserwowane już od ponad stu lat i występują zarówno samotnie, jak i w układach podwójnych. Wykrycie czarnych karłów jest raczej nieprawdopodobne, a obecnie po prostu niemożliwe. Po pierwsze, szacuje się, że czas potrzebny do wystygnięcia białych karłów to co najmniej 10^{14} lat [2]. Jest to zatem znacznie więcej niż wiek Wszechświata, dlatego też żaden czarny karzeł nie miał jeszcze szans powstać. Po drugie, po czasie 10^{20} lat przestrzeń kosmiczna ulegnie takiemu rozszerzeniu, iż praktycznie gwiazdy będą doskonale odizolowane od siebie, a w takiej sytuacji trudno wyobrazić sobie ich obserwacje [1].

Aby czarne karły miały w ogóle sposobność się narodzić, musiałyby pokonać jeszcze jedną przeszkodę. Warunkiem koniecznym do ich powstania jest stabilność protonu, a ten, jak nam się aktualnie wydaje, nie jest cząstką trwałą. Co prawda czas jego rozpadu określa się na co najmniej 10^{34} lat, ale odliczając wiek Wszechświata, czarne karły rodziłyby się już z materii zawierającej „wiekowe” protony. Zatem w przypadku niestabilności tych cząstek, czarne karły nie byłyby w stanie przetrwać tylu lat, żeby reakcje pycnonuklearne zamieniły je w gwiazdy żelazne.

Prawdziwość scenariusza opisanego w niniejszym artykule zależy więc przede wszystkim od natury protonu. Czarne karły mają szanse na zaistnienie, lecz ich zamiana w gwiazdy żelazne i wybuch supernowej są niemożliwe w świetle naszej dzisiejszej wiedzy. Jednak niczego nie należy wykluczać, ponieważ nie mamy wystarczających naukowych podstaw do tego, aby przewidywać i opisywać procesy fizyczne, które będą zachodzić we Wszechświecie w tak odległej skali czasowej. Kto wie, być może ktoś zaobserwuje kiedyś wybuch supernowej czarnego karła?

Literatura

- [1] Caplan, M. E. *MNRAS* **497**, 4357 (2020).
 [2] Dyson, F. J. *Rev. Mod. Phys.* **51**, 447 (1979).