

Ciche supernowe

Michał BEJGER*



Rozwiązanie zadania M 1248.

Zdefiniujmy funkcję f wzorem:

$f(n) =$ reszta z dzielenia liczby n przez 4.

Wówczas warunek $f(n) = f(m)$ oznacza, że liczba $m - n$ jest podzielna przez 4, a więc liczba $m - n$ nie może być liczbą pierwszą. Wobec tego istnieje funkcja f spełniająca warunki zadania, której zbiór wartości jest 4-elementowy.

Zauważmy, że różnica każdych dwóch liczb (większa minus mniejsza) spośród 1, 3, 6, 8 jest liczbą pierwszą, a zatem liczby $f(1), f(3), f(6), f(8)$ są różne. Stąd wniosek, że zbiór wartości każdej funkcji f , spełniającej warunki zadania, musi zawierać co najmniej 4 elementy.

Gwiazdy neutronowe są bardzo interesującymi, bo przypuszczalnie najgęstszymi materialnymi obiektami w Kosmosie – obiekty te mają masę rzędu masy Słońca, lecz promień jedynie około 10 km. Ich istnienie zostało przewidziane teoretycznie w 1932 r. przez Lwa D. Landaua jeszcze przed doświadczalnym potwierdzeniem istnienia neutronów, od których biorą dziś swą nazwę.

W przeciwieństwie bowiem do znanej z codziennego doświadczenia materii ziemskiej, mającej w przybliżeniu tyle samo neutronów co protonów, głównym składnikiem tych gwiazd są neutrony. W pewnym sensie można je zatem traktować jak ogromne (składające się z około 10^{57} nukleonów) jądra atomowe. Dlaczego? Wystarczy prosty rachunek, by przekonać się, że ich średnia gęstość przekracza gęstość jądra atomowego. Na Ziemi jedna łyżeczka takiej materii ważyłaby zatem mniej więcej tyle samo, ile wszyscy obecnie żyjący ludzie! Stabilność materii gwiazdy neutronowej zapewnia oczywiście potężna grawitacja, działająca przeciwnie do sił ciśnienia. Jest to nie lada gratka dla astronomów, umożliwia bowiem badanie bardzo gęstej materii w stanie nieosiągalnym w ziemskich laboratoriach: w samym centrum gwiazdy gęstość przekracza wielokrotnie gęstość jądra atomowego, a w takich warunkach prawdopodobne jest powstanie nowych egzotycznych form materii (jak np. kwarki swobodne). Obecnie astronomowie obserwują około 2000 gwiazd jako pulsary radiowe (pierwszy tego typu obiekt został odkryty w 1967 r.). Gwiazdy neutronowe, stanowiące składniki układów podwójnych ze zwykłymi gwiazdami, białymi karłami oraz innymi gwiazdami neutronowymi, są źródłami promieniowania elektromagnetycznego w całym zakresie widma, emitują także neutrina i fale grawitacyjne.

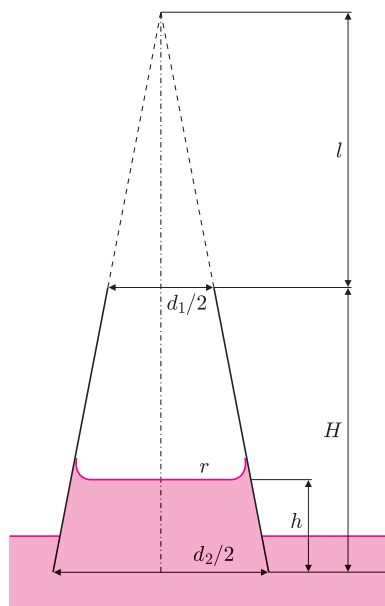
Skąd biorą się gwiazdy neutronowe? W roku 1934 Fritz Zwicky oraz Walter Baade zaproponowali hipotezę powstawania tych niezwykle gęstych obiektów. Według nich za produkcję gwiazd neutronowych odpowiedzialne są supernowe, bo – oprócz olbrzymiej ilości energii wyemitowanej podczas wybuchu jako fale elektromagnetyczne i neutrina – wewnątrz mgławicy, tworzącej się ze szczątków, powinno się obserwować coś jeszcze: młodą gwiazdę neutronową. Hipoteza została potwierdzona w roku 1968 przez odkrycie pulsara w pozostałości po supernowej z roku 1054, w mgławicy Krab. Obecnie naukowcy zgadzają się, że taka pozostałość powstaje wskutek zapadnięcia się masywnej gwiazdy, w której gęstym i gorącym centrum ustają procesy produkujące energię. Początkowa masa takiej gwiazdy, tj. wtedy, gdy znajduje się ona na ciągu głównym, czyli gdy źródłem energii w jej jądrze jest synteza wodoru w hel, musi przekraczać 8 mas Słońca. Po „spaleniu” w procesie fuzji termojądrowej lekkich pierwiastków, takich jak wodór, hel itd. i wytworzeniu cięższych, takich jak nikiel i żelazo, siły ciśnienia okazują się niewystarczające do zrównoważenia sił grawitacji i cała gwiazda zaczyna się zapadać. Niedobór ciśnienia termicznego, wspomagany dodatkowo przez unoszące energię neutrina, wywołuje katastrofalną kompresję materii – żelazowo-niklowe jądro gwiazdy zostaje zgniecione do rozmiarów kilkudziesięciu kilometrów i osiąga gęstość porównywalną z gęstością jądrową. W tym momencie istotne stają się krótkozasięgowe oddziaływania silne pomiędzy nukleonami, które powodują, że spadające zewnętrzne warstwy gwiazdy zostają gwałtownie wyhamowane, a następnie odrzucone. Zjawiska te mogą zostać zaobserwowane w dalekich nawet galaktykach jako wybuchy supernowych typu II (ang. *core-collapse supernova*).

Teoretycznie drugim sposobem na wyprodukowanie gwiazdy neutronowej jest „zapadnięcie się” białego karła w procesie tzw. cichej supernowej. Biały karzeł jest gwiazdą o rozmiarach porównywalnych z rozmiarem Ziemi oraz masie nieprzekraczającej (przy braku rotacji) 1,4 masy Słońca. Jest on końcowym stadium ewolucji gwiazdy, która na ciągu głównym miała masę mniejszą niż

* Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika, Warszawa



Rozwiązanie zadania F 744.
Wysokość, na jaką wzniesie się woda, wynosi $h = 2\alpha/\rho g r$, gdzie r to promień rurki kapilarnej na poziomie wody w kapilarze.



Z podobieństwa trójkątów mamy

$$\frac{l+H-h}{r} = \frac{l+H}{d_2/2}$$

Mamy zatem

$$h = \frac{4\alpha}{\rho g d_1 (l+H-h)}$$

Rozwiązując powyższe równanie względem h , otrzymujemy dwie wartości: 18,4 cm oraz 1,6 cm. Warunki zadania spełnia tylko druga z tych wielkości.

około 8 mas Słońca, a która po przekształceniu się w czerwonego olbrzyma (czyli po etapie syntezy helu do cięższych pierwiastków) i odrzuceniu zewnętrznej otoczki stała się mgławicą planetarną z gorącym, typowo tlenowo-węglowym jądrem w środku (możliwe są również cięższe pierwiastki, takie jak neon i magnez). Masę maksymalną owego jądra, czyli nowo powstałego białego karła, nazywamy masą Chandrasekhara, honorując w ten sposób dokonania Subrahmanyana Chandrasekhara, który masę tę oszacował w 1930 r. Ograniczenie wynika z faktu, że ciśnienie stabilizujące siłę grawitacji nie pochodzi z procesów syntezy termojądrowej, zapewniane jest natomiast przez obecność zdegenerowanych elektronów. Mówiąc o degeneracji, mamy tu na myśli konsekwencję mechaniki kwantowej, a ściślej – reguły Pauliego, że dwie cząstki o spinie połówkowym, jak np. elektrony, nie mogą zajmować tego samego stanu kwantowego; stany energetyczne są więc zajmowane od energii podstawowej do coraz większych energii, a te wyżej leżące stany dają wkłady do ciśnienia. Z energetycznego punktu widzenia biały karzeł jedynie wyświeca, powoli stygnąc, to, co zgromadził w poprzednich etapach ewolucji. Jeśli możliwa jest wydajna akrecja materii, co ma miejsce, gdy gwiazda znajduje się w układzie podwójnym, gwiazda ta powiększa swą masę aż do masy Chandrasekhara. Po przekroczeniu tej wartości traci stabilność. Co się wtedy dzieje? Obecnie uważa się, że pewien typ supernowych, oznaczany symbolem Ia, jest skutkiem takiej właśnie utraty stabilności. Mechanizm wybuchu opiera się na gwałtownym termojądrowym zapłonie węgla i tlenu wywołanym przez podgrzanie i kompresję materii w centrum białego karła, która sprawia, że ciśnienie zdegenerowanych elektronów staje się niewystarczające do przeciwstawienia się siłom grawitacji. Katastrofalna detonacja obejmuje całą gwiazdę, która dosłownie rozpada się na kawałki. Supernowe Ia są bardzo istotnym narzędziem pomiarowym współczesnej astronomii – jeśli bowiem są wynikiem eksplozji bardzo podobnych obiektów (tzn. białych karłów o masie Chandrasekhara), to charakter wybuchu, wyemitowana energia, czas trwania i ilość wytworzonych radioaktywnych pierwiastków powinna być w każdym przypadku taka sama. Zatem znając obserwowaną jasność eksplozji oraz – z teorii – ilość wyemitowanej energii, możemy oszacować odległość do supernowej. Supernowa typu Ia jest zatem przykładem świecy standardowej, czyli obiektu, którego odległość można wyznaczyć na podstawie jego cech charakterystycznych.

Istnieje jednak teoretyczna możliwość, że w przypadku białego karła składającego się z pierwiastków cięższych niż węgiel i tlen, takich jak neon i magnez, emisja neutrin wywołana przez wychwytywanie elektronów podczas zapadania się gwiazdy może przeciwdziałać wzrostowi temperatury i nie doprowadzić do zapłonu termojądrowego lub spowodować jedynie małą, w porównaniu do zwykłej supernowej Ia, eksplozję. Materia gwiazdy nie jest wówczas gwałtownie odrzucana, co może skutkować narodzinami gwiazdy neutronowej. Postuluje się również istnienie białych karłów mających w głębokim wnętrzu fazę krystaliczną, np. krystaliczny węgiel, która powstawałaby podczas stopniowego ochładzania się gwiazdy. Proces zapadania się takiego obiektu jest z pewnością jakościowo różny od zapadania się zwykłego białego karła.

Częstość występowania cichych supernowych jest kłopotliwa do oszacowania, ponieważ niejako z definicji są one trudne w detekcji. Do dyspozycji mamy jedynie pośrednie wskazówki na podstawie występowania w Galaktyce neutrononadmiarowych izotopów powstających w procesie zapadania się i późniejszego wyrzutu materii. Według oszacowań mniej niż jedna na 1000 gwiazd neutronowych, znajdujących się w Galaktyce, powstała w wyniku cichej supernowej, pozostałe są skutkiem zapadnięcia się supernowej typu II. To dość pesymistyczne oszacowanie nie jest jednak dowodem, że ciche supernowe w ogóle nie występują, obserwuje się bowiem wiele gwiazd neutronowych, których istnienie jest trudne do wyjaśnienia przez model supernowej typu II i których powstanie tłumaczy się zapadnięciem się białego karła w wyniku akrecji. Gwiazdy neutronowe kryją więc wciąż w swych gęstych wnętrzach wiele zagadek.