



Dr Tomasz KWAST

Chyba każda młoda gałąź nauk przyrodniczych przeżywała we wczesnej fazie rozwoju okres „porządkowania” swoich obiektów badań. Tak było z botaniką i zoologią, kiedy powstawała klasyfikacja organizmów żywych, tak było z chemią, gdy powstawał okresowy układ pierwiastków, w pewnym stopniu jest obecnie w podobnej sytuacji fizyka cząstek elementarnych. Okres ten nie ominął i astronomii. Pod koniec ubiegłego wieku nagromadziło się już tyle obserwacji widm gwiazd, że pojawiła się potrzeba zrobienia z tym porządku, co doprowadziło do powstania tzw. harwardzkiej klasyfikacji gwiazd. Jej podstawą jest wygląd widma (tzn. względne natężenia poszczególnych linii widmowych), który w pierwszym przybliżeniu można określić jednym symbolem. Wkrótce stwierdzono, że ten wygląd widma, czyli tzw. typ widmowy gwiazdy, dość ściśle zależy od jej temperatury powierzchniowej. Fakt ten dowodzi, że temperatura powierzchniowa jest czynnikiem decydującym o wyglądzie widma gwiazdy i powinien naturalnie wynikać z teorii budowy gwiazd.

Zanim jednak powstała jakakolwiek teoria budowy gwiazd doszło do odkrycia jednej z najważniejszych zależności pomiędzy parametrami gwiazd, której ilustracją jest słynny diagram Hertzsprunga-Russella (H-R), przedstawiony na okładce. Tradycyjnie na jego osi poziomej odkłada się typ widmowy (równoważny temperaturze powierzchniowej), a na pionowej jasność absolutną gwiazdy (równoważną jej mocy — jasność absolutna jest liczbowo proporcjonalna do logarytmu mocy). Obejrzenie dowolnego diagramu H-R (oczywiście, sporządzonego dla rozsądnie licznej grupy gwiazd) prowadzi do pozornie banalnego wniosku, że punkty, z których każdy reprezentuje jakąś gwiazdę, układają się na nim nierównomiernie — ogromna większość układu się w dość wąskie pasmo biegnące wzdłuż przekątnej wykresu (jest to tzw. ciąg główny). Ale z tego wynika, że gwiazdy nie są byle jakie, co dokładniej oznacza, że gwiazda o konkretnej temperaturze ma konkretną moc, a przynajmniej tak jest dla gwiazd ciągu głównego.

Znalezienie uzasadnienia diagramu H-R było wspaniałym polem do popisu dla teoretyków. Obecnie teoria budowy gwiazd jest już dość dobrze ugruntowana i diagram H-R jest jej piękną ilustracją. Wiemy już np., że gwiazda nie może być lżejsza, niż ok. 0,08 masy Słońca, gdyż nie byłaby wtedy w stanie wytworzyć w swoim centrum warunków niezbędnych dla produkcji energii jądrowej, czyli po prostu nie byłaby gwiazdą. A czy istnieje górna granica masy gwiazd? Otóż zauważmy, że każda gwiazda może żyć spokojnie tak długo, jak długo równoważą się siły działające na każdy element jej masy. Siły te są trzy: grawitacja działająca ku środkowi gwiazdy oraz ciśnienie gazu i ciśnienie promieniowania działające na zewnątrz. W gwiazdach typu Słońca to ostatnie jest nawet zaniedbywalne i po prostu ciężar warstw gazu równoważony jest przez jego ciśnienie. Wyobraźmy sobie teraz, że na taką gwiazdę nakładamy po trochu dodatkową masę. Za każdym razem gwiazda zostaje lekko ściśnięta przez dodatkowy ciężar, zatem lekko wzrasta gęstość i temperatura wnętrza, jako dalszy skutek wzrasta tempo produkcji energii i ustala się nowa równowaga przy lekko podwyższonych ciśnieniach gazu i promieniowania. Ale tak nie można w nieskończoność, czego oczywiście nie można stwierdzić bez przeprowadzenia stosownych rachunków. Chodzi jednak o to, że w miarę wzrostu masy gwiazdy ciśnienie promieniowania rosnęło dużo szybciej, niż pozostałe dwie siły, wskutek czego gwiazda o masie przekraczającej tysiąc mas Słońca swoim strumieniem promieniowania oderwałaby swoje zewnętrzne warstwy. Przedstawiony tu eksperyment z gotową gwiazdą jest czysto myślowy, a naprawdę górna granica masy jest dużo niższa, gdyż formująca się z rozproszonej materii gwiazda już przy masie rzędu 100 mas Słońca może swoim strumieniem promieniowania „rozpedzić na cztery wiatry” swój macierzysty obłok i do skupienia masy większej nie dojdzie.

Na początku swojego życia normalna gwiazda jest zatem obiektem o masie pomiędzy 0,08 a ok. 100 mas słonecznych, temperaturze powierzchniowej od 3000 do 50 000 K, średniej gęstości od 0,01 do 100 g/cm³ (czyli od 10 do 100 000 kg/m³), jednorodnym chemicznie (głównym składnikiem jest wodor) i świecącym na koszt energii termojądrowej produkowanej w jądrze przy przemianie wodoru w hel. W ten sposób gwiazda żyje jako gwiazda ciągu głównego nawet miliardy lat — jest to najdłuższy, spokojny etap jej życia. Ale wcześniej czy później dochodzi do zużycia wodoru w centrum. Kolejne etapy ewolucji zaczynają teraz następować szybciej po sobie. Energia termojądrowa jest teraz produkowana poza centrum w nieco zwiększonym tempie, a w samym środku gwiazdy tworzy się helowe jądro, które jako nieaktywne (jest tam zbyt chłodno, aby hel mógł przejąć rolę paliwa jądrowego) będzie w miarę powiększania się ulegać zgniataniu przez ciężar wyższych warstw. Zjawisku temu towarzyszy pęcznienie otoczki gwiazdy, a więc spadek temperatury powierzchniowej. Nasza gwiazda opuszcza więc ciąg główny i przesuwa się na diagramie H—R w prawo w górę stając się tzw. czerwonym olbrzymem — bardzo ładna, obrazowa nazwa.

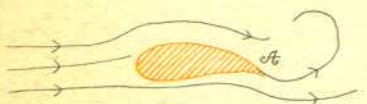
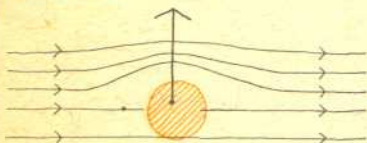
Jest to przejściowe, dosyć krótkotrwałe stadium życia gwiazdy, ale ważne, gdyż teraz właśnie w jej centrum dzieją się jakościowo nowe rzeczy. Mianowicie materia jądra wskutek dużej gęstości przestaje zachowywać się jak znany z klasycznej fizyki gaz doskonały. Dzieje się tak, gdyż elektronom, dającym największy wkład do ciśnienia gazu, zaczyna być w tej gęstości „za ciasno” w tym sensie, jak za ciasno jest im w normalnym atomie. W atomie elektrony nie spadają na najniższą orbitę (czyli do stanu o najmniejszej energii), gdyż z przyczyn wyjaśnionych przez mechanikę kwantową nie ma tam dla nich miejsca i dlatego muszą obsadzić kilka wyższych orbit odpowiadających większym energiom. Podobnie w gęstym gazie nie ma miejsca dla elektronów o małej energii, muszą one zachowywać energię odpowiednio większą i taki gaz, zwany zdegenerowanym, wywiera ciśnienie większe, niż wywierałby gaz doskonały o takiej samej gęstości. Ale najważniejsze, że dla takiej kuli zdegenerowanego gazu, gdy się dostatecznie rozrośnie, staje się obojętne, że zewnętrzne warstwy gwiazdy są jeszcze na swoim miejscu, czy nie. Może dojść wręcz do odrzucenia otoczki gwiazdy i kula zdegenerowanego helu „wyjrzy na światło dzienne” utrzymując już tylko własnymi siłami swą równowagę. Będzie to nowy typ



Rozwiązanie zadania F 112

Prędkość cieczy w punktach symetrycznych względem środka przekroju walca jest taka sama, bo przepływ ma dwie prostopadłe osie symetrii l i k . Ponieważ ciśnienie w cieczy idealnej zależy od kwadratu prędkości, siły działające w tych punktach równoważą się.

Po zsumowaniu przepływów prędkość ponad wałecem będzie większa niż pod wałecem. Odpowiadająca temu różnica ciśnień da działającą na wałek wypadkową siłę skierowaną do góry (siła nośna). Tak więc, dopóki ciecz nie „krąży” wokół walca, siła nośna jest równa zeru. Wynik ten jest słuszny również dla profilu lotniczego. Pojawienie się takiego „krążenia” wokół skrzydła startującego samolotu pozornie narusza zasadę zachowania momentu pędu (moment pędu względem środka walca w optywie (a) jest równy zeru). Pozornie — bowiem tarcie o powierzchnię skrzydła powoduje, że prędkość cieczy płynącej wzdłuż górnej (dłuższej) powierzchni skrzydła jest na krawędzi A skrzydła mniejsza niż prędkość cieczy wypływającej spod skrzydła.



W efekcie powstaje wir, którego moment pędu kompensuje moment pędu cieczy krążącej wokół skrzydła. W ten po pewnym czasie dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu krawędzi, odrywa się. Lepkość ma więc podstawowe znaczenie jedynie w chwili powstawania „krążenia”. Później, analizując problem, ciecz możemy traktować jak idealną.



Rozwiązanie zadania M 292. Przenosząc wszystkie wyrazy z niewiadomymi na jedną stronę i mnożąc przez 2 otrzymujemy układ, w którym $a_{ii} (i = 1, 2, 3, 4)$ są nieparzyste, (a więc różne od 0), a pozostałe współczynniki są parzyste. Odejmując pierwsze równanie pomnożone przez odpowiednie stałe, od pozostałych możemy otrzymać układ, w którym niewiadoma x_1 występuje tylko w pierwszym równaniu, przy czym współczynniki na przekątną są nadal nieparzyste, a pozostałe parzyste. Postępując tak dalej otrzymujemy układ postaci

$$\begin{aligned} b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 + b_{14}x_4 &= 0 \\ b_{22}x_2 + b_{23}x_3 + b_{24}x_4 &= 0 \\ b_{33}x_3 + b_{34}x_4 &= 0 \\ b_{44}x_4 &= 0 \end{aligned}$$

gdzie b_{ii} są nieparzyste, a więc $x_4 = 0$ i kolejno $x_3 = 0, x_2 = 0, x_1 = 0$.

stabilnej gwiazdy, tzw. biały (lub zdegenerowany) karzeł. Znówu jest to bardzo obrazowa nazwa. Gwiazda taka jest rzeczywiście niewielka, rozmiarów większej planety, a więc słaba i biaława wskutek bardzo wysokiej temperatury powierzchniowej (jest to wszak odsłonięte jądro dawnego czerwonego olbrzyma), natomiast jej masa jest rzędu masy Słońca. Łatwo obliczyć, że jej gęstość jest wobec tego rzędu 10^9 kg/m^3 , a więc milion razy większa od gęstości wody. Białe karły, jako gwiazdy słabe i gorące, leżą w lewym dolnym rogu diagramu H—R. Znając ich pochodzenie wiemy, że reakcje termojądrowe w nich nie zachodzą (co najwyżej w cienkiej warstewce wodoru przy powierzchni), a więc świecą właściwie tylko dzięki zwyczajnemu stygnięciu. Tak wygląda końcowy etap życia gwiazd stosunkowo mało masywnych.

Jeżeli bowiem początkowa masa gwiazdy jest odpowiednio większa, to jej ewolucja przebiega w sposób bardziej skomplikowany. Wskutek potężnego ściśnięcia helowego jądra może się ono tak dalece ogrzać, że zacznie zachodzić produkcja energii kosztem przemiany helu w cięższe pierwiastki, z kolei one się „zapalają” i taki ciąg coraz cięższych paliw może sięgnąć węgla, a najcięższym produktem reakcji termojądrowych może być nawet żelazo. Te etapy życia gwiazd masywniejszych nie są jeszcze dostatecznie dobrze poznane, ale najprawdopodobniej np. jądro węglowe ma w pewnym momencie ochotę detonować, a żelazne zapaść się. W obu przypadkach dzieją się straszne rzeczy — wydzielają się w krótkim czasie tak kolosalne ilości energii, że przez jakiś czas gwiazda świeci z mocą taką, jak wszystkie gwiazdy Galaktyki razem wzięte, a jest ich bądź co bądź w przybliżeniu 10^{11} . Krótko mówiąc, mamy wtedy wybuch supernowej, tzw. supernowej II typu.

Czy coś z takiego kataklizmu pozostaje, rzecz jasna poza rozprężającą się chmurą gazów? Wszystko wskazuje na to, że tak, nawet w przypadku detonacji jądra węglowego, która, jak się wydaje, jest przez pewne procesy tłumiona i nie rozrywa gwiazdy doszczętnie. Okazuje się, że wskutek nieuchronnego wtedy ściśnięcia i tak już gęstego jądra elektrony nie mogą istnieć niezależnie od protonów, łączą się parami i następuje tzw. neutronizacja materii. W centrum wybuchu powstaje kula niezwykle zgęszczonej neutronowej materii o masie również rzędu masy Słońca, lecz o promieniu stu czy nawet zaledwie dziesięciu kilometrów. Daje to gęstość zbliżoną do gęstości materii jądrowej (10^{17} kg/m^3), co jak na obiekt makroskopowy jest dość fantastyczne. Jest to tzw. gwiazda neutronowa, obiekt „odkryty” wpraw teoretycznie na papierze, ale dziś znany już i na niebie i to w wielu egzemplarzach. Świeci ona — jak biały karzeł — poprzez stygnięcie, ale również ściągając na siebie rozproszoną materię z otoczenia wywołuje w niej charakterystyczne świecenie, które może być widziane z wielkich odległości. W sumie jest to drugi typ stabilnego obiektu, będącego końcowym stadium życia gwiazdy, tym razem początkowo bardziej masywnej.

Zarówno białe karły, jak i gwiazdy neutronowe są, jak widzimy, obiektami o potężnej grawitacji i to ona powoduje, że ich masy nie mogą być dowolne, a dokładniej — nie mogą przekraczać pewnych wartości krytycznych (wspomnieliśmy już, że dla obu tych typów gwiazd masa krytyczna jest zbliżona do masy słonecznej). Powyżej masy krytycznej gwiazdy te nie byłyby w stanie zachować równowagi sił ciężkości i ciśnienia i musiałyby się „zaważyć” pod własnym ciężarem. Zresztą prawdopodobnie i tak do tego może dojść, przynajmniej w przypadku białych karłów. Mianowicie, gdy masa białego karła jest prawie krytyczna, a tym samym gęstość wyjątkowo duża, następuje coś w rodzaju powolnej neutronizacji materii. W wyniku tego elektronów ubywa, ciśnienie wewnętrzne spada i wreszcie gwiazda zapada się, niewykluczone, że do stadium gwiazdy neutronowej. W każdym razie wyzwolona zostaje wielka ilość energii dając zjawisko supernowej I typu — mniej okazałe niż supernowej II typu, ale też lepiej oglądać je z daleka.

Nie wiemy, czy w podobny sposób może zapaść się po jakimś czasie gwiazda neutronowa. Można natomiast przewidzieć, że np. wyjątkowo masywne żelazne jądro czerwonego nadolbrzyma zapadając się może od razu mieć ochotę utworzyć gwiazdę neutronową o masie większej od krytycznej. Wtedy do powstania gwiazdy neutronowej w ogóle nie dojdzie, stadium to w ułamku sekundy zostanie przeskoczony i ... Właśnie, co wtedy?

Współczesna astronomia, fizyka cząstek elementarnych i teoria grawitacji razem wzięte skłaniają się tu do twierdzenia, że obiektów stabilnych gęstszych od gwiazd neutronowych nie ma. Nie znamy praw przyrody pozwalających na zrównowazenie własnego ciężaru takich hipotetycznych nadgęstych obiektów. Uważa się, że taki obiekt może już tylko zapadać się. Być może, będzie zapadać się „do punktu”, ale tego akademickiego problemu i tak nie ma co dyskutować, gdyż przed osiągnięciem rozmiarów punktowych przestanie być obserwowalny. Mianowicie ogólna teoria względności przewiduje, że po skurczeniu się do kuli o promieniu $r_g = 2GM/c^2$ (jest to tzw. promień grawitacyjny, M oznacza tu masę obiektu, G stałą grawitacji, c prędkość światła) obiekt zniknie z pola widzenia. Upraszczając zagadnienie można powiedzieć, że stanie się to dlatego, iż z obszaru o tak potężnej grawitacji nie może wydostać się nawet światło — do obszaru tego wszystko może tylko wpadać i to w dowolnych ilościach. Obiekt taki, tzw. czarna dziura, będzie swą obecność przejawiać tylko za pośrednictwem pola grawitacyjnego swej (punktowej?) masy oraz poprzez świecenie otaczającej go, a chwytejanej przezeń materii międzygwiazdowej.

Co dzieje się z materią, z cząstkami elementarnymi wewnątrz czarnej dziury — nie wiemy. Współczesna fizyka tam nie sięga. Stwierdzenie, że pod dostatecznie wielkim naciskiem nawet neutrony okazują się „miękkie”, oczywiście niczego nie wyjaśnia. Wizja błąkających się w przestrzeni dowolnie masywnych czarnych dziur wysysających, co tylko napotkają na swej drodze, wydaje się dość upiorna. A może ich w ogóle nie ma? Sęk w tym, że chyba są, aczkolwiek nie ma dotychczas przekonującego dowodu, że obiekt taki w konkretnym miejscu istnieje. Najsilniejsze podejrzenia dotyczą obiektu znanego pod nazwą Cygnus X—1, co oznacza, że jest to pierwsze źródło rentgenowskie wykryte w gwiazdozbiornie Łabędzia. Emisja rentgenowska świadczy właśnie o tym, że musi tam być obiekt z bardzo silną grawitacją, wywołujący to świecenie w otaczającym go gazie. Natomiast obserwacje optyczne dowodzą, że jest to gwiazda podwójna, w której nawet składnik lżejszy ma masę większą od krytycznej dla białych karłów czy gwiazd neutronowych. Chyba zatem musi to być czarna dziura. Jest ona wprawdzie dość daleko, co najmniej 2500 parseków, ale sama jej obecność może chyba być odrobinę denerwująca ...

