

Ewolucja gwiazd

■ AGATA NOWAK-STĘPNIOWSKA

Patrząc nocą w rozgwieżdżone, bezchmurne, letnie niebo nietrudno zadać sobie pytanie o to skąd wzięły się te wszystkie obiekty i co się z nimi stanie w przyszłości.



Rys. 1. Mgławica w kształcie orla. Struktura ta jest wysoka na 10 lat świetlnych

Źródło: NASA, JPL-Caltech, P. S. Teixeira (CfA)

Czy będą, lub już są to słońca innych układów planetarnych? Czy może będą to w przyszłości supernowe? A może będą to czarne dziury, lub znikną niezauważone bez spektakularnej agonii? Warto sobie zadać pytanie, co się stanie z naszym Słońcem – jaka je i zarazem nas czeka przyszłość.

Do początku od końca

Niektóre z gwiazd u kresu swego istnienia wchodzą w fazę supernowej. Gdy następuje wybuch supernowej, materia jest rozrzucona przez ogromną falę uderzeniową. Wówczas materia budująca gwiazdę uwalniana jest z powrotem do wszechświata. Wówczas wchodzi w skład materii międzygwiazdnej, która jest mieszaniną głównie wodoru i helu (pozostałości po Wielkim Wybuchu), a także cięższych pierwiastków (powstałych wskutek wybuchów supernowych). Po pewnym czasie, materia zaczyna się wzajemnie przyciągać tworząc coraz to gęstsze twory. W ten sposób powstają z materii międzygwiazdnej mgławice (rys. 1–5). Rejony szczególnie bogate w wodór, to tzw. chmury molekularne. Te skupiska cząsteczkowego wodoru są bardzo zimne (10 do 20 K) i wyjątkowo gęste (10^6 – 10^{10} cząstek na cm^3). Ewentualne zewnętrzne czynniki, chociażby takie jak wybuch odległej supernowej, mogą wprowadzić to gęste skupisko wodoru w stan nierównowagowy. Wtedy ta struktura zaczyna się zapadać i wyraźnie rośnie jej temperatura (rośnie gęstość i cząsteczki zaczynają się coraz intensywniej zderzać, co skutkuje wzrostem temperatury). Wówczas taki gazowy twór ma już wystarczająco wysoką temperaturę, by wypromieniowywać fale o długościach mikro-



Rys. 2. Zdjęcie z teleskopu Hubble'a mgławicy Carina Nebula (NGC 3372). Obiekt ten znajduje się ok. 8000 lat świetlnych od Ziemi, a sam ma średnicę ponad 200 lat świetlnych
Źródło: NASA, the Hubble Heritage Team and Nolan R. Walborn (STScI), Rodolfo H. Barba' (La Plata Observatory, Argentina), and Adeline Caulet (France)



Rys. 4. Zdjęcie przedstawia formowanie się gwiazd w mgławicy. Wkrótce ich temperatura znacząco wzrośnie i zniszczą one tym struktury z gazu i pyłu, z których same powstały
Źródło: NASA, JPL-Caltech, P. S. Teixeira (CfA)



Rys. 3. Mgławica w Wielkim Obłoku Magellana, NGC 2080. Rozciąga się na dystansie 50 lat świetlnych. Zdjęcie wykonano za pomocą teleskopu Hubble'a
Źródło: NASA, ESA, Mohammad Heydari-Malayeri (observatoire de Paris) et al



Rys. 5. Kolumnowe struktury formowane z materii międzygwiazdnej są jak góry. We wrogim środowisku ulegają erozji. Jak widać w przedstawionej na zdjęciu mgławicy formują się pierwsze gwiazdy o małej masie (różowe kropki)
Źródło: NASA, HST, WFPC2, J. Hester (Arizona St. U) et al.

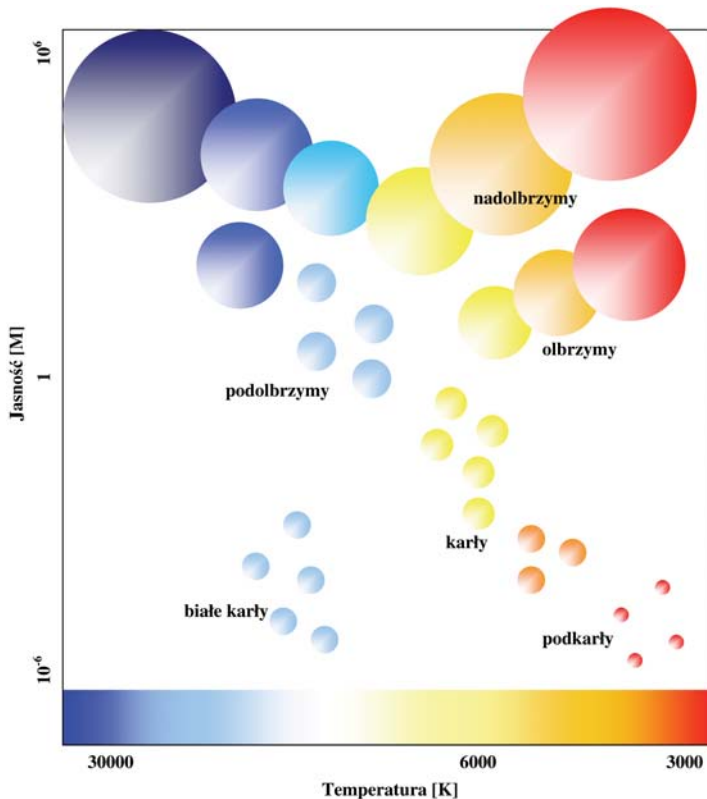
falowych i podczerwonych. Zainicjowany przez zewnętrzną siłę wzrost gęstości chmury cząsteczek wodoru postępuje, wskutek czego gęstość materii rośnie w dużym tempie. Po pewnym czasie materia osiąga taką gęstość, że staje się ona nieprzepuszczalna dla wcześniej emitowanego promieniowania mikrofalowego i podczerwonego. W związku z tym promieniowanie to jest uwięzione i znacznie przyspiesza wzrost temperatury i ciśnienia materii. Po pewnym czasie układ ma już zgromadzoną tak ogromną ilość energii, że rozpoczyna się synteza termojądrowa. Wówczas można już mówić o powstaniu protogwiazdy. Protogwiazdy osiągają temperaturę zwykle w granicach 2000–3000 K. Są zatem wystarczająco gorące, by świecić na czerwono, jednakże pył otaczający protogwiazdę blokuje promieniowanie z zakresu widzialnego.

Co dalej?

Powstanie protogwiazdy, to dopiero jej narodziny, a co z jej dorosłym życiem i zmierzchem życia? Otóż w zależności od temperatury i intensywności promieniowania, los może być mniej lub bardziej łaskawy dla gwiazdy. Ścieżkę ewolucji można łatwo przewidzieć stosując diagram Hertzsprung’a-Russell’a (w skrócie diagram HR). Jest on dla astronomów tym, czym dla chemików układ okresowy pierwiastków (rys. 6). Na diagramie tym można wyróżnić tzw. ciąg główny, na którym znajdują się większość gwiazd. W ciągu głównym znajdują się gwiazdy, w których synteza jądrowa jest stabilna.

Jeśli protogwiazda uformuje się z materii o masie niższej niż 0,08 mas Słońca, to wówczas wewnętrzna temperatura takiej gwiazdy jest zbyt niska, by zainicjować syntezę termojądrową. Ta nieudana gwiazda

to tzw. **brązowy karzeł**. Jest to twór będący czymś pomiędzy planetą, taką jak Jowisz, a gwiazdą. Gwiazdy świecą, ponieważ w ich jądrach zachodzi synteza termojądrowa, a temperatura w nich osiągnięta dochodzi nawet do 3 000 000 K. Wzrost temperatury spowodowany jest grawitacyjnym przyciągnięciem. Zatem jeśli powstała protogwiazda ma małą masę, mniejszą niż 8% masy Słońca, to wów-



Rys. 6. Diagram HR. Przekątna idąca od niskich temperatur i niskich intensywności, do wysokich temperatur i wysokich intensywności to tzw. ciąg główny. 90% gwiazd to gwiazdy należące do ciągu głównego.

czas ma zbyt słabą grawitację, by przyciągać materię z taką siłą, by osiągnąć tak olbrzymią temperaturę, skutkiem czego fuzja jądrowa nie zachodzi. Zatem brązowe karły są zbyt wielkie, by być klasyfikowane tak jak gazowe olbrzymy typu Jowisz, lecz zbyt małe by być gwiazdami. Ponadto karły te emitują promieniowanie podczerwone.

Zaistnieć również może sytuacja, że z małej masy (ale większej niż 8% masy Słońca) uformuje się gwiazda. W związku z tym, że jest dość mała, ma mało wodoru, zatem reakcja termojądrowa po pewnym czasie ustanie. Gwiazdy o małej masie, których „paliwo” się wyczerpało to tzw. **czerwone karły** (rys. 7). Należy przy tym wspomnieć, że gwiazda najbliższa naszemu Słońcu to czerwony karzeł.

Gwiazdy, które ewoluują tak samo jak nasza, to ciała o masie od 0,8 do 8 mas naszego Słońca. Mają tak olbrzymią masę, że wodoru wystarcza na 10 miliardów lat syntezy helu. Gdy cały wodór się wyczerpie, wówczas synteza jądrowa ustanie, a następnie gwiazda zacznie się zapadać w ten sposób, że warstwy będące przy jądrze gwiazdy będą zapadać się znacznie szybciej, niż te przy powierzchni. Podczas takiego procesu, hel zacznie się nagrzewać. Wówczas temperatura osiągnie tak wysoką wartość, że zacznie się synteza termojądrowa cięższych pierwiastków, takich jak węgiel i tlen z helu. W międzyczasie, zewnętrzne warstwy gwiazdy rozrosną się do niewyobrażalnych rozmiarów i wówczas taką gwiazdę można już określić mianem **czerwonego olbrzyma**. Z czasem, czerwony olbrzym zaczyna pulsować i stadium to nazywa się Mira. Pulsacje te owocują zmianą częstości promieniowania (długości fali) i intensywności. Wtenczas gwiazdy typu Słońca mogą na diagramie HR przejść na gałąź olbrzymów. Należy tu zaznaczyć, że nie wszystkie gwiazdy przechodzą przez to stadium. Gwiazda w stadium czerwonego olbrzyma, może wyrzucać sporo materii i w ten sposób tworzyć wokół siebie **mgławicę planetarną**. Pozo-



Rys. 7. Czerwony karzeł

Źródło: NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian CfA



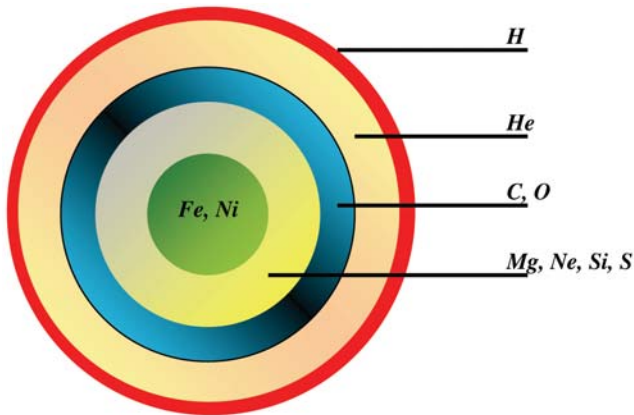
Rys. 8. Nowonarodzona gwiazda

Źródło: NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian CfA



Rys. 9. Czarna dziura

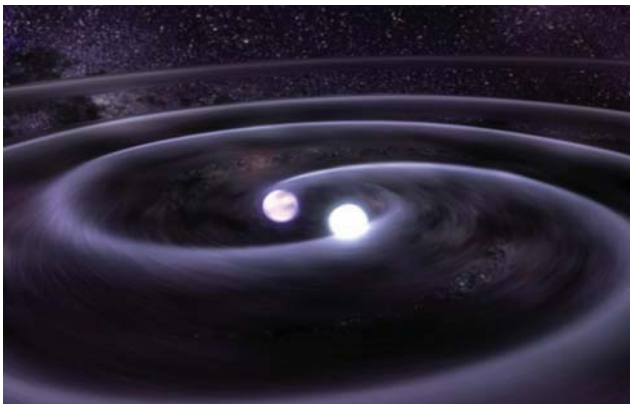
Źródło: NASA/CXC/CfA/D. Evans et al.; Optical/UV: NASA/STScI; Radio: NSF/VLA/CfA/D. Evans et al., STFC/JBO/MERLIN



Rys. 10. Warstwowa struktura masywnej gwiazdy



Rys. 11. 8484 Lat świetlnych od Ziemi, właśnie formują się młode gwiazdy
Źródło: NASA/JPL/University of Arizona



Rys. 12. W układzie binarnym dwa białe karły orbitują wzajemnie
Źródło: NASA/Tod Strohmayer (GSFC)/Dana Berry (Chandra X-Ray Observatory)

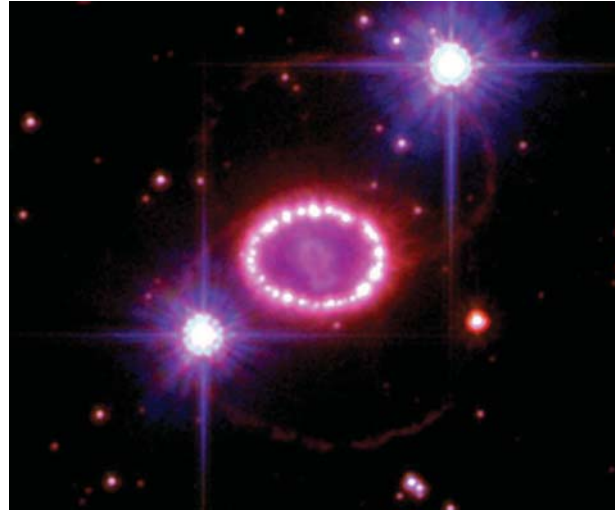
stałość po czerwonym olbrzymie to tzw. **biały karzeł**. Białe karły są zbudowane z niesamowicie gęstej materii. Istnienie ich gwarantuje równowaga pomiędzy przyciąganiem grawitacyjnym, a odpychaniem elektronów atomów tworzących karła. Masa krytyczna dla białego karła, by pozostał w równowadze to 1,4 masy Słońca – jest to tzw. limit Chandrasekhar'a. Istnieje możliwość, że biały karzeł wypromieniuje całą swoją nadwyżkę energii i wówczas stanie się on **czarnym karłem**. W tym miejscu trzeba napomknąć, że Wszechświat jest jeszcze zbyt młody (i to o ładnych parę miliardów lat), aby potwierdzić empirycznie istnienie czarnych karłów.

Mówiąc o gwiazdach wielkości Słońca, na miejscu będzie pytanie: jak wygląda przyszłość naszej gwiazdy? Gdy Słońcu skończy się wodór, przejdzie ono w stadium czerwonego olbrzyma, świecąc 500-krotnie mocniej niż obecnie. Po około miliardzie lat, słońce będzie świecić mniej intensywnie i kolor czerwony nie będzie już tak wyraźny. Istnieją zdania, że stadium to, to tzw. żółty olbrzym. Rozpocznie się wówczas synteza jąder helu (wskutek czego powstawać będzie prawdopodobnie węgiel) i wówczas nastąpi ekspansja objętości. Słońce zacznie odrzucać swe zewnętrzne warstwy i powstanie wówczas biały karzeł, o temperaturze rzędu 20 000 K. biały karzeł będzie świecił przez następne 12 miliardów lat,

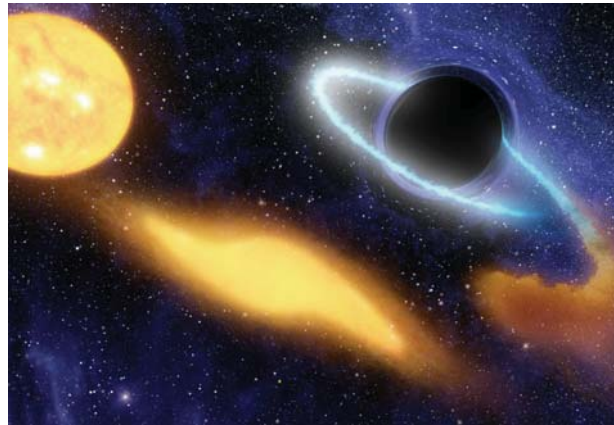
po czym stanie się czarnym karłem. A zatem smutny jest przyszły los naszej gwiazdy.

Nad wyraz interesująco wygląda sytuacja w układach binarnych, gdy są dwie gwiazdy o masach zbliżonych do masy Słońca. Załóżmy, że interesuje nas układ binarny, gdzie jedna gwiazda ma masę słońca, a druga jest pięciokrotnie cięższa. W cięższej gwiazdzie wodór skończy się szybciej, zatem szybciej przejdzie przez stadium czerwonego olbrzyma i szybciej wyrzucając z siebie materię stanie się białym karłem. W tym samym czasie, lżejszy partner zaczyna wchodzić w stadium czerwonego olbrzyma. Rzecz jasna, by stać się białym karłem, wyrzuca mgławicę planetarną. Tą wyrzuconą materię przechwytuje, za pomocą grawitacji, biały karzeł, który powstał wcześniej. Taki transfer masy następuje do momentu, gdy wcześniej uformowany biały karzeł osiągnie masę krytyczną, będącą 1,4 mas Słońca. Wówczas temperatura i ciśnienie w jądrze białego karła są tak ogromne, że rozpoczyna się wybuchowa synteza termojądrowa i biały karzeł zostaje natychmiastowo zniszczony w jednym, ogromnym wybuchu jądrowym. Cała materia, w tym ciężkie pierwiastki powstające podczas syntez jądrowych na różnych etapach ewolucji gwiazdy zostają rozrzucone po wszechświecie z prędkością dochodzącą do 48 000 000 km/h. Zjawisko to nosi nazwę wybuchu **supernowej typu Ia**.

Gwiazdy masywne (o masie większej niż 8 mas Słońca) występują o wiele rzadziej, niż ich mniejsze kuzynki, jednakże mają one ogromny wkład we właściwości galaktyk, w których występują. To dzięki nim powstają cięższe pierwiastki chemiczne. Większość gwiazd powstaje w sąsiedztwie gwiazd masywnych, zatem mają one niebagatelny wpływ na powstawanie gwiazd mniejszych i średnich. Formując się protogwiazda, z której powstanie gwiazda masywna, również prowadzi syntezę helu z wodoru. Następnie z helu, po wyczerpaniu wodoru, powstają węgiel i tlen. Węgiel i tlen ogrzewają się i wskutek syntez termojądrowych, z pierwiastków tych powsta-



Rys. 13. Wybuch supernowej. Cechą charakterystyczną supernowej są tuziny różowych luminescencji, które ją otaczają
 Źródło: NASA, ESA, P. Challis and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)



Rys. 14. Artystyczna wizja czarnej dziury, która zaczyna pochłaniać sąsiadującą gwiazdę
 Źródło: NASA/JPL-Caltech

ją neon, magnez, krzem i siarka. Następnie krzem i siarka mogą być substratami do produkcji żelaza, niklu i innych pierwiastków o jądrach o zbliżonych masach. Oczywiście w różnych warstwach gwiazdy, procesy te zachodzą z różną szybkością i dlatego też masywna gwiazda przypomina cebulę (rys. 10). Całkiem na zewnątrz, wciąż zachodzi synteza helu z wodoru,

a jądro wewnętrzne zbudowane jest z niklu i żelaza, które po podgrzaniu nie mogą samoczynnie przejść w cięższe pierwiastki, bo do takiego procesu wymagana jest olbrzymia energia dostarczona z zewnątrz. Gdy zaczyna się już całkowicie kończyć wodór do syntezy helu, masywna gwiazda zaczyna stawać się supergigantem (gałąź supergigantów na diagramie HR). Gwiazda w takim stanie pulsuje i jest wytrącona ze stanu równowagowego. Po pewnym czasie, żelazne (lub żelazo-niklowe) jądro gwiazdy osiąga krytyczną masę 1,4 masy Słońca. Wtedy to, szybciej niż w sekundę, jądro potrafi zmniejszyć swoją średnicę nawet 400-krotnie. Jądro kurczy się tak gwałtownie, że zewnętrzne warstwy nie mają czasu, by zareagować. Podczas tego zdarzenia uwalniana jest niewyobrażalnie ogromna porcja energii. Większość tej energii, emitowana jest do wszechświata w formie neutrin. Pozostała energia uruchamia towarzyszący temu zjawisku wybuch supernowej. Fala uderzeniowa związana z tym wydarzeniem, porusza się z prędkością rzędu 16 000 000 km/h i niesie ze sobą tyle energii, że inicjuje syntezę pierwiastków cięższych niż żelazo. W ten sposób po wszechświecie rozsiewane są pierwiastki cięższe od wodoru i helu. Taki materiał, bogaty w różne pierwiastki, może rozpocząć formację nowej gwiazdy. Wyżej opisane zapadnięcie się jądra masywnej gwiazdy, to tzw. wybuch **supernowej typu II**. Pozostałość po tym wybuchu to ciało, które może być gwiazdą neutronową (pulsarem lub magnetarem), a nawet czarną dziurą.

Gwiazdy neutronowe swoją masą przekraczają krytyczną wartość 1,4 masy Słońca. Siły odpychające pomiędzy elektronami, w tym partykularnym przypadku, są za słabe, by przeciwdziałać grawitacji. Gwiazda neutronowa ma tak silną grawitację, że ścisnąca ona ze sobą elektrony z jądrami atomów, a to powoduje, że elektrony łączą się z protonami i dają neutrony. Gwiazdy neutronowe nie kurczą się całkowicie, ponieważ grawitacji przeciwstawiają

się oddziaływania pomiędzy neutronami. **Pulsary**, to gwiazdy neutronowe, które obracając się wysyłają strumienie cząstek, tak silnych, że emitują promieniowanie X. Gwiazdy neutronowe mają bardzo silne pole magnetyczne, a jeśli dodać do tego bardzo raptowne obroty, to łatwo wyobrazić sobie, że wytwarzają one też bardzo silne pole elektryczne, o potencjale rzędu 10^{12} V. Dzięki tak silnemu polu, emitowane są również elektrony poruszające się z zawrotnymi prędkościami. **Magnetary**, to gwiazdy neutronowe o niesamowicie silnym polu magnetycznym. Emitują one potwornie krótkie błyski promieniowania X. Jeśli jądro kurczącej się gwiazdy ma trzykrotnie większą masę niż Słońce, to wówczas nawet oddziaływania między neutronami nie są w stanie przeciwstawić się sile grawitacji. Neutrony zostają wepchnięte w siebie wzajemnie, a była gwiazda staje się **horyzontem zdarzeń czarnej dziury**. Panuje tam ekstremalnie silne pole grawitacyjne, silne na tyle, że nawet promieniowanie elektromagnetyczne nie może się stamtąd wydostać. Na dodatek tak silne pole oddziałuje też na czasoprzestrzeń.

Co jest zapisane w gwiazdach, o gwiazdach?

Jeśli powstaje gwiazda i znana jest jej masa i położenie na diagramie HR, łatwo przewidzieć jaki będzie jej los. Może z wieku młodzieńczego od razu przejść w wiek starczy, gdy ma bardzo małą masę. Może również eksplodować jako supernowa i być siewcą zalążków nowych gwiazd. Może też żyć spokojnie swoim życiem i dopiero po wielu miliardach lat ulec dalszej ewolucji.

AGATA NOWAK-STĘPNIOWSKA

Absolwentka Wydziału Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie,
doktorantka na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.