

\* Narodowe Centrum Badań Jądrowych

$M_{\odot}$  to masa Słońca wynosząca  $1,998 \times 10^{30}$  kg.

Mgławica planetarna nie ma nic wspólnego z planetami. To chmura pyłu i gazu powstała po odrzuceniu przez błądzącą u schyłku życia gwiazdę zewnętrznym warstw wodoru. W jej centrum zazwyczaj znajduje się biały karzeł. Skąd więc ta myląca nazwa? Określenie mgławica planetarna to pozostałość historyczna. Dawniej astronomowie obserwując okrągły kształt takich mgławic, porównywali je do planet.

Granica Chandrasekhara  $M_{Ch} = 1,44M_{\odot}$  to maksymalna masa białego karła. Po przekroczeniu tej masy biały karzeł zapada się pod własnym ciężarem i wybucha jako supernowa typu Ia.

O supernowych wielokrotnie pisaliśmy na łamach *Delty*. Na przykład w artykułach *Podglądanie supernowej  $\Delta_{19}^4$*  i *Supernowe typu Ia  $\Delta_{12}^1$* .

Krzywa zmian blasku opisuje obserwowane zmiany jasności obiektu, np. gwiazdy, wraz z upływającym czasem.

Supernowa typu II to etap ewolucji gwiazdy o masie większej niż  $9M_{\odot}$ .

*Rozwiązanie zagadki ze strony 10:* Trzy kolejne wyrazy podanego ciągu to: 16, 22, 30. Każdy wyraz tego ciągu to kolejna liczba naturalna zapisana w cyklicznie zmieniającym się systemie pozycyjnym od dziesiątego przez dziewiątkowy i tak dalej aż do dwójkowego.

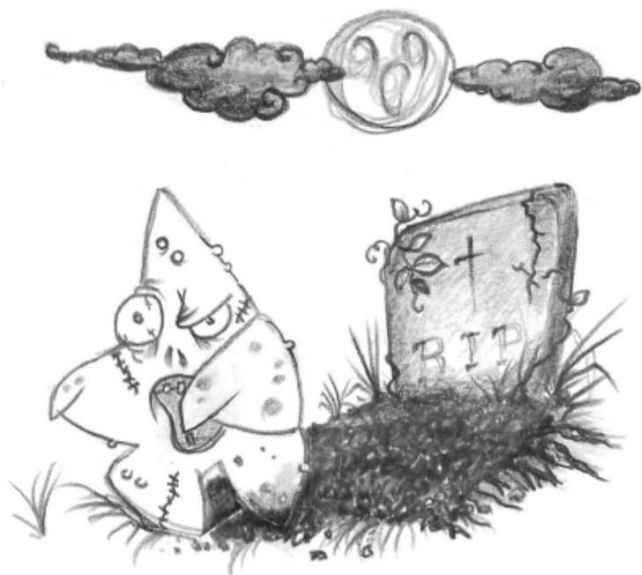
Mimo że gwiazdy wydają się wieczne, to jednak ich życie kończy się wraz z ustaniem reakcji termojądrowych. Przyczyna śmierci jest zwykle taka sama, ale to, w jaki sposób gwiazda umiera, zależy od jej masy. W przypadku mało masywnych gwiazd ( $M \leq 8M_{\odot}$ ) reakcje termojądrowe zanikają, gdy węgiel i tlen zaczynają dominować w jądrze gwiazdy. Wówczas taka gwiazda odrzuca wodorową otoczkę, tworząc mgławicę planetarną. Wewnątrz pozostaje martwe jądro gwiazdy nazywane „białym karłem”. W przypadku masywnych obiektów ( $M \geq 8M_{\odot}$ ) reakcje termojądrowe zachodzą aż do momentu powstania jądra zbudowanego z żelaza. Następnie gwiazda zapada się pod własnym ciężarem i wybucha jako supernowa, pozostawiając po sobie gwiazdę neutronową albo czarną dziurę.

Nierzadko gwiazdy rodzą się w parach i żyją razem aż do śmierci. Takie układy nazywamy układami podwójnymi gwiazd. Mogą je tworzyć różne typy gwiazd. Jednym z przykładów jest układ podwójny tworzony przez białego karła znajdującego się blisko dużej, masywnej gwiazdy. W takich układach dość często zdarza się, że materia masywnej gwiazdy sphywa na białego karła w wyniku oddziaływania grawitacyjnego. Masa białego karła w rezultacie zwiększa się – aż do momentu, gdy przekroczy pewną masę krytyczną, zwaną granicą Chandrasekhara. Wówczas następuje wybuch supernowej typu Ia. Eksplozja jest tak silna, że całkowicie niszczy białego karła.

Mogłoby się wydawać, że dysponujemy dużą wiedzą na temat supernowych. Zaobserwowaliśmy jednak dziwne zjawiska, które stanowią wyzwanie dla istniejących teorii i modeli. Są to gwiazdy, które, jak się zdaje, przetrwały swoją śmierć. W literaturze popularnonaukowej znane są jako „gwiazdy zombie”.

## Supernowa o kilku maksimach jasności

Pierwszą kandydatką do otrzymania tytułu gwiazdy zombie jest supernowa o bardzo dziwnej krzywej zmian blasku. Jasność typowych supernowych w trakcie wybuchu na początku zwykle szybko wzrasta, osiąga maksimum, a następnie już znacznie spokojniej maleje. Wszystko trwa zazwyczaj około 100 dni. Odkryta we wrześniu 2014 roku przez zespół amerykańskich naukowców niedaleka, bo oddalona jedynie o 509 500 000 lat świetlnych od Ziemi ( $z = 0,034$ ), supernowa iPTF14hls jest pod tym względem bardzo nietypowa. Została sklasyfikowana jako supernowa typu IIP, a jej jasność zmieniała się przez  $\sim 1000$  dni obserwacji (prowadzonych do 2018 r.), prezentując aż pięć maksimów, co sugerowałoby wystąpienie kilku następujących po sobie wybuchów supernowych. Po tym czasie jasność gwiazdy gwałtownie spadła. Co ciekawe, po przeszukaniu archiwów astronomicznych okazało się, że w tej samej lokalizacji zaobserwowano wybuch supernowej w 1954 roku. Według badaczy dane dotyczą tej samej gwiazdy. Żadna z istniejących teorii nie wyjaśnia, jak to możliwe. Naukowcy przypuszczają, że tak naprawdę obserwowane maksima jasności nie oznaczały wybuchów supernowej, ale pomniejsze erupcje, w czasie których gwiazda odrzucała tylko wierzchnie warstwy wodoru. Problem polega na tym, że energia tych mniejszych erupcji nie powinna być równa energii towarzyszącej wybuchowi przeciętnej supernowej. A na to wskazywałyby dane obserwacyjne – zarówno te z 1954 roku, jak i współczesne. Oczywiście naukowcy zasugerowali kilka możliwych rozwiązań mogących tłumaczyć te obserwacje: odrzucone podczas mniejszych wybuchów warstwy wodoru oddziaływały ze środowiskiem międzygwiazdowym, powodując jego świecenie, co z kolei powodowało zmiany jasności w krzywych blasku; mogła to być niezwykle silna gwiazda pulsująca, która w końcowych etapach życia odrzucała zewnętrzne warstwy przed ostatecznym wybuchem supernowej; mógł to być magnetar. Nie mamy jednak definitywnej odpowiedzi. Jedną z najbardziej egzotycznych teorii sugeruje, że w jądrze gwiazdy iPTF14hls spalana była antymateria. Zgodnie z tą hipotezą jądra masywnych gwiazd stają się tak gorące, że energia jest przekształcana w materię i antymaterię, powodując niestabilność gwiazdy i wielokrotne silne erupcje. Antymateria w kontakcie z materią powodowałaby eksplozje, które



Autorka rysunku: Manuela Figueira

„zdmuchują” zewnętrzne warstwy gwiazdy, pozostawiając nienaruszony rdzeń; proces ten mógłby powtarzać się przez dziesięciolecia przed ostatecznym wybuchem supernowej i przekształceniem gwiazdy w czarną dziurę.

### Zlewanie się białych karłów

Kolejną kandydatką do tytułu zombie jest gwiazda, która umarła, pozostawiając po sobie białego karła, a następnie w wyniku zupełnie nieoczekiwanego zjawiska „odżyła”. Mowa tutaj o obiekcie J005311 odkrytym dzięki obserwacjom satelity WISE. Jest to jasna gwiazda umieszczona wewnątrz mgławicy gazowej.

Co ciekawe, sama gwiazda emituje światło w paśmie widzialnym, ale otaczająca ją mgławica widoczna jest tylko w paśmie podczerwonym. Początkowo na podstawie linii emisyjnych obiekt ten zaklasyfikowano jako gwiazdę typu Wolfa-Rayeta (która już sama w sobie jest dziwna).

Gwiazdy Wolfa-Rayeta są bardzo duże i bardzo gorące. Mają rozległą i rozrzedzoną powłokę gazową, która jednocześnie rozszerza się z dużą prędkością.

Niektóre cechy obserwowanej gwiazdy zdecydowanie odbiegały od normy. W szczególności nie zaobserwowano w jej składzie ani wodoru, ani helu. Według modeli zbudowana jest w 80% z tlenu i 20% z węgla. Na podstawie kompozycji gwiazdy naukowcy doszli do wniosku, że powstała ona z połączenia dwóch białych karłów. Jedynie w taki sposób można wytłumaczyć obecność tej gwiazdy w mgławicy gazu oraz zupełny brak linii emisyjnych w długościach fal optycznych.

Masa gwiazdy J005311 zdecydowanie przekracza granicę Chandrasekhara. Biały karzeł przekraczając tę granicę, powinien stać się supernową. W tym wypadku dwa białe karły odżyły, łącząc się i tworząc nową gwiazdę. Po ich zderzeniu reakcje termojądrowe rozpoczęły się od nowa, zapobiegając zapadaniu się grawitacyjnemu, które doprowadziłoby do wybuchu. Jak się okazuje, zjawisko to nie jest aż tak bardzo wyjątkowe, jak sądziliśmy wcześniej. Szacuje się, że aż do 10% białych karłów łączy się w pary, aby przeżyć. W dodatku modele opisujące procesy łączenia się białych karłów naturalnie tłumaczą powstawanie magnetycznych białych karłów (czyli białych karłów posiadających bardzo silne pola magnetyczne).

### Supernowe typu Iax

I w ten sposób przechodzimy do ostatniej grupy kandydatów, supernowych typu Iax. Supernowe Iax to podklasa supernowych typu Ia, o których mowa była wcześniej. Warto zaznaczyć, że te konkretne supernowe nie są tak do końca wyjątkowe, gdyż stanowią aż 30% supernowych typu Ia. Jednak w przeciwieństwie do pozostałych gwiazd typu Ia – supernowe Iax nie są wystarczająco silne, żeby całkowicie zniszczyć białego karła. Po wybuchu pozostaje jego część: gwiazda-zombie. Przykładami takich obiektów są gwiazdy SN2005hk, SN2008A czy SN2014dt. Natomiast niecodziennym przypadkiem jest SN2012Z, którą obserwowano zarówno przed, jak i po eksplozji. Dzięki zdjęciom pochodzącym z teleskopu Hubble’a naukowcy mogli precyzyjnie przestudiować zmiany jej jasności w ciągu ~1425 dni od eksplozji. Okazało się, że po prawie czterech latach po eksplozji SN2012Z nie tylko nie zniknęła (tak jak typowa supernowa), ale stała się jaśniejsza niż przed eksplozją! Czyżby więc gwiazda odżyła po eksplozji? Do dzisiaj nie mamy dokładnej odpowiedzi. Co ciekawe, z obliczeń astronomów wynika, że masa SN2012Z, niezwyklej gwiazdy-zombie, to około  $0,5 M_{\odot}$ . Oznacza to, że obserwowana ilość światła nie może pochodzić tylko od pozostałości po białym karle. Prawdopodobne wytłumaczenie jest takie, że światło, które obserwujemy, pochodzi z oddziaływania fali uderzeniowej z materią międzygwiazdową lub wzrostu jasności pobliskiej gwiazdy związanego z jej ogrzaniem po wybuchu towarzysza.

Zwrot „gwiazda zombie” bardzo często pojawia się w doniesieniach popularyzujących astronomię. Określenie to przeniknęło nawet do literatury specjalistycznej (choć opornie) i można je znaleźć w kilku artykułach naukowych.



**Rozwiązanie zadania M 1732.**  
Z warunków zadania dostajemy równanie:

$$\sum_{i=1}^{2022} \left( \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \right)^2 = \sum_{i=1}^{2022} x_i^2,$$

gdzie  $x_{2023} := x_1$ . Przekształcając, łatwo dostajemy:

$$\sum_{i=1}^{2022} \left( \frac{x_i - x_{i+1}}{2} \right)^2 = 0,$$

skąd wnioskujemy, że  $x_i = x_{i+1}$  dla  $i = 1, \dots, 2022$ .