

7. Lolek i Tola napisali na karteczkach po liczbie naturalnej, po czym przekazali je w tajemnicy Bolkowi. Bolek wziął dwie karteczki, na jednej z nich napisał sumę, a na drugiej – iloczyn otrzymanych liczb. Następnie zjadł obie otrzymane karteczki i jedną

ze swoich, a pozostałą pokazał Lolkowi i Toli. Widniała na niej liczba 1282. „Nie wiem, jaką liczbę przekazałeś Bolkowi” – powiedziała Tola do Lolka. „Nie wiem, jaką liczbę przekazałeś Bolkowi” – powiedział Lolek do Toli. Jaką liczbę przekazał Bolkowi Lolek?

## Ekstremalne kosmiczne laboratoria, część I *Karolina ROŻKO\**

\*Instytut Astronomii im. Prof. J. Gila, Uniwersytet Zielonogórski

Autorka tego tekstu pragnie podziękować dr. hab. Wojciechowi Lewandowskiemu, prof. UZ za cenne uwagi do artykułu.

Pisząc *wkrótce*, mamy na myśli czas około jednego dnia, gdyż tyle potrzeba, aby żelazowe jądro osiągnęło masę krytyczną. Dla porównania: czas syntezy helu wynosi około kilkadziesiąt milionów lat, czas syntezy węgla – od kilkuset tysięcy do miliona lat, czas syntezy neonu – kilka tysięcy lat, a czas syntezy krzemu – kilka lat.

Średnicę 20 km mają zimne gwiazdy neutronowe, natomiast protogwiazdy mogą mieć około 50 km.

Średnia gęstość gwiazd neutronowych wynosi około  $4 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ , co stanowi  $10^{14}$  gęstości Słońca.

Zasada zachowania momentu pędu głosi, że dla dowolnego izolowanego układu punktów materialnych całkowita suma ich momentów pędu jest stała.

W pierwszym przybliżeniu możemy przyjąć moment bezwładności dla jednorodnej kuli:  $\frac{2}{5}Mr^2$ , gdzie  $M$  – masa gwiazdy,  $r$  – promień gwiazdy.

1 Tesla to  $10^4$  Gaussów.

Ewolucja bardzo masywnych gwiazd, czyli takich, których masa przekracza około 8 mas Słońca, kończy się w znacznie bardziej spektakularny sposób niż ewolucja obiektów mniej masywnych (pisał już o nich Miguel Figueira w artykule *Gwiazdne przedszkola w  $\Delta_{20}^4$* ).

W końcowym etapie ewolucji bardzo masywne gwiazdy są w stanie rozpocząć syntezę żelaza w swoim wnętrzu. Jest to ostatni proces syntezy termojądrowej, który może zachodzić we wnętrzu gwiazdy, ponieważ synteza cięższych pierwiastków nie uwalnia energii, a wręcz przeciwnie – wymaga, aby dostarczyć ją z zewnątrz. Dlatego też wkrótce po powstaniu żelaza w jądrze gwiazdy całkowicie ustają reakcje termojądrowe, a to z kolei sprawia, że znika ciśnienie, które chroniło jądro gwiazdy przed zapadnięciem się, tzw. *kolapsem*, czyli *zapaścią* pod wpływem siły grawitacji. W wyniku tej zapaści grawitacyjnej materia ulega silnemu zagęszczeniu: elektrony są dosłownie wciskane do protonów, tworząc w ten sposób neutrony. W efekcie jądro gwiazdy kurczy się do momentu, gdy ciśnienie zdegenerowanej neutronowej materii oraz pewne efekty kwantowe są w stanie powstrzymać dalszą zapaść, co z reguły dzieje się, gdy zapadające się jądro osiągnie rozmiar kuli o średnicy około 20 km. Ze względu na swoją budowę obiekty takie nazywamy gwiazdami neutronowymi. Gdy swoją ewolucję kończą najbardziej masywne gwiazdy (czyli te przekraczające około 20 mas Słońca), nic nie jest w stanie powstrzymać kolapsu grawitacyjnego i wówczas powstają czarne dziury (trzeba jednak zaznaczyć, że naukowcy wciąż nie są do końca pewni, czy ten podział jest tak prosty). W obu przypadkach zewnętrzne warstwy gwiazdy zostają rozrzucone w wyniku wybuchu supernowej będącej jednym z najbardziej energetycznych zjawisk we Wszechświecie.

### Gwiazdy neutronowe – ciąg ekstremalnych cech fizycznych

Gwiazdy neutronowe mają średnicę zaledwie 20 km, ale ich masa zawiera się zazwyczaj w przedziale między 1 a 2 masami Słońca! Łatwo zgadnąć, że takie obiekty mają ekstremalną gęstość. Ale co to właściwie znaczy? Aby to zrozumieć, zróbmy małe porównanie: 1 łyżeczka (czyli 5 ml) takiej materii ważyłaby  $5,5 \times 10^{12}$  kg. Jeśli założymy, że słoń waży przeciętnie 5,5 tony, to możemy powiedzieć, że jedna łyżeczka materii z gwiazdy neutronowej waży tyle co miliard słońi.

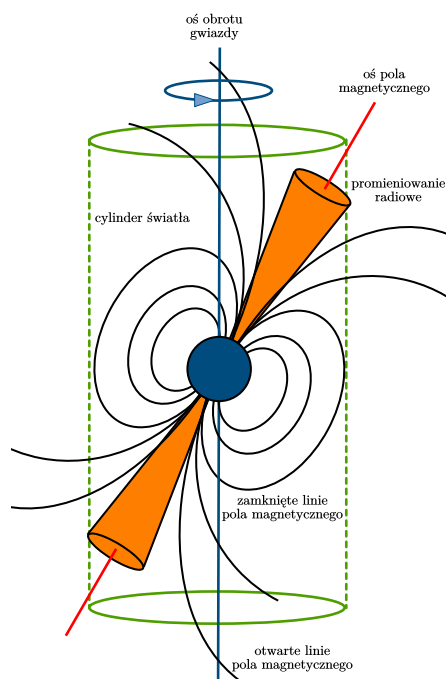
Ogromna gęstość nie jest jedyną niezwykłą cechą gwiazd neutronowych.

Ze względu na zasadę zachowania momentu pędu nowo powstałe gwiazdy będą obracać się bardzo szybko: typowy okres rotacji wynosi zaledwie 10 milisekund (tzn. że obracają się 100 razy na sekundę). Dla porównania okres rotacji Słońca wynosi aż 27 dni! Ponieważ moment jest iloczynem momentu bezwładności i prędkości kątowej, gdy moment bezwładności gwałtownie maleje po zapaści jądra, prędkość kątowa musi tak samo gwałtownie wzrosnąć.

Równie znaczący efekt wywiera prawo zachowania strumienia magnetycznego: kompresji ulega pole magnetyczne jądra gwiazdy. W rezultacie gwiazdy neutronowe mają ekstremalnie silne pola magnetyczne. Dla porównania pole magnetyczne Słońca wynosi około 0,3 Tesli. Gdybyśmy zmniejszyli promień Słońca z około 700 000 km do 10 km, to pole magnetyczne Słońca osiągnęłoby wartość  $1,5 \times 10^9$  Tesli, czyli porównywalną z typową wartością siły pola magnetycznego gwiazd neutronowych.

Aby dopełnić ten obraz, dodajmy, że pole grawitacyjne gwiazdy neutronowej również jest bardzo silne: z tego powodu najwyższa góra, jaka mogłaby

Tak naprawdę z powodu silnego pola grawitacyjnego niemożliwe jest stanie na powierzchni gwiazdy neutronowej.



Obiekty takie jak te opisane obok nazywamy pulsarami zasilanymi energią rotacyjną. Istnieją też gwiazdy neutronowe zasilane energią akrecyjną, o których jednak nie piszemy w tym artykule.

Hewish, A.; Bell, S. J.; Pilkington, J. D. H.; Scott, P. F.; Collins, R. A., 1968, „Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source”, *Nature*, 217: 709–713.

powstać na jej powierzchni, miałyby zaledwie 3 mm wysokości. Średnia wartość przyspieszenia grawitacyjnego przy powierzchni gwiazdy neutronowej wynosi między  $10^{12}$  a  $10^{13}$  m/s<sup>2</sup>. Oznacza to, że gdybyśmy mogli stanąć na powierzchni gwiazdy neutronowej i zrzucilibyśmy monetę z wysokości 1 m, to spadłaby ona w ciągu zaledwie 12  $\mu$ s, a przy dotarciu do powierzchni gwiazdy osiągnęłaby prędkość 2/3 prędkości światła.

Podsumowując, typowe gwiazdy neutronowe to obiekty o średnicy około 20 km, charakteryzujące się ekstremalnie dużą gęstością, silnym polem magnetycznym oraz silnym polem grawitacyjnym i obracające się częściej niż raz na sekundę.

### Gwiazda neutronowa jak latarnia morska

Gdy oś pola magnetycznego nie pokrywa się z osią obrotu gwiazdy neutronowej, obiekty te wysyłają promieniowanie w zakresie radiowym w podobny sposób, w jaki świeci latarnia morska. Aby to zrozumieć, spójrzmy na chwilę na schemat pokazujący tzw. model latarni morskiej. W samym środku znajduje się gwiazda neutronowa. Plazma, czyli naładowane cząsteczki wyrwane z powierzchni gwiazdy, uwięziona jest w obszarze wypełnionym zamkniętymi liniami pola magnetycznego. W pewnej odległości od powierzchni gwiazdy prędkość liniowa rotującej plazmy zbliża się do osiągnięcia prędkości światła. Umownie obszar, gdzie prędkość liniowa cząstek w magnetosferze osiągnęłaby dokładnie prędkość światła (co oczywiście jest niemożliwe), nazywamy tzw. cylindrem światła. Obszar ten dzieli magnetosferę gwiazdy neutronowej na dwie części: zamkniętych linii pola magnetycznego (które w całości mieszczą się wewnątrz cylindra światła) oraz otwartych linii pola magnetycznego. To właśnie wzdłuż otwartych linii pola powstaje promieniowanie radiowe, które omiata Wszechświat niczym światło latarni morskiej.

W jaki sposób to promieniowanie powstaje? W pierwszym przybliżeniu pole magnetyczne pulsara może być traktowane jako dipol, a zgodnie z klasyczną elektrodynamiką rotujący dipol magnetyczny powinien wypromieniowywać energię w postaci fali elektromagnetycznej. Mówiąc trochę bardziej szczegółowo: wyobraźmy sobie, że z powierzchni gwiazdy w miejscu, gdzie wychodzą otwarte linie pola magnetycznego (jest to tzw. obszar czapy polarnej), na skutek różnicy potencjału elektrycznego między powierzchnią czapy polarnej a Wszechświatem wyrwane są naładowane cząsteczki (elektrony i protony). Ulegają one przyspieszeniu do ultra-relatywistycznych prędkości wzdłuż linii pola i w efekcie mogą tworzyć fotony  $\gamma$ , które z kolei z powodu obecności silnego pola magnetycznego rozpadają się na pary elektron–pozyton. Proces ten ma charakter lawinowy i doprowadza do powstania kaskady elektronów.

Gdy wtórne elektrony poruszają się wzdłuż krzywizny otwartych linii pola magnetycznego, ulegają przyspieszeniu dośrodkowemu. Zgodnie z zasadami elektrodynamiki przyspieszane naładowane cząstki emitują promieniowanie, które dociera na Ziemię w postaci regularnych błysków. To właśnie ta cecha gwiazd neutronowych pozwoliła na ich odkrycie.

W 1967 roku Jocelyn Bell pomogła zbudować radioteleskop, który służył m.in. do poszukiwania kwazarów. Jocelyn była wówczas studentką na Uniwersytecie w Cambridge. Podczas analizowania zebranych danych zauważyła dziwny sygnał, który powtarzał się z niezwykłą regularnością. Początkowo wraz ze swoim promotorem – Antonym Hewishem – przypuszczali, że są to zakłócenia pochodzące z Ziemi. Sygnał ten powtarzał się jednak wyłącznie w konkretnym miejscu na sferze niebieskiej. W roku 1968 w *Nature* ukazał się artykuł, w którym zaproponowano, że obserwowany sygnał może pochodzić od gwiazd neutronowych, zaś ze względu na niezwykłą regularność, z jaką powracał, obiekty te nazwano pulsarami. Do roku 1967 istnienie gwiazd neutronowych było jedynie przewidywane teoretycznie, dlatego było to bardzo znaczące odkrycie naukowe, za które w 1974 roku Antony Hewish (a nie Jocelyn Bell) otrzymał Nagrodę Nobla. Obecnie pulsary traktowane są przez większość astrofizyków jako kosmiczne laboratoria, to jednak temat na kolejną opowieść o tych fascynujących obiektach. . .