

Ekstremalne kosmiczne laboratoria, część II

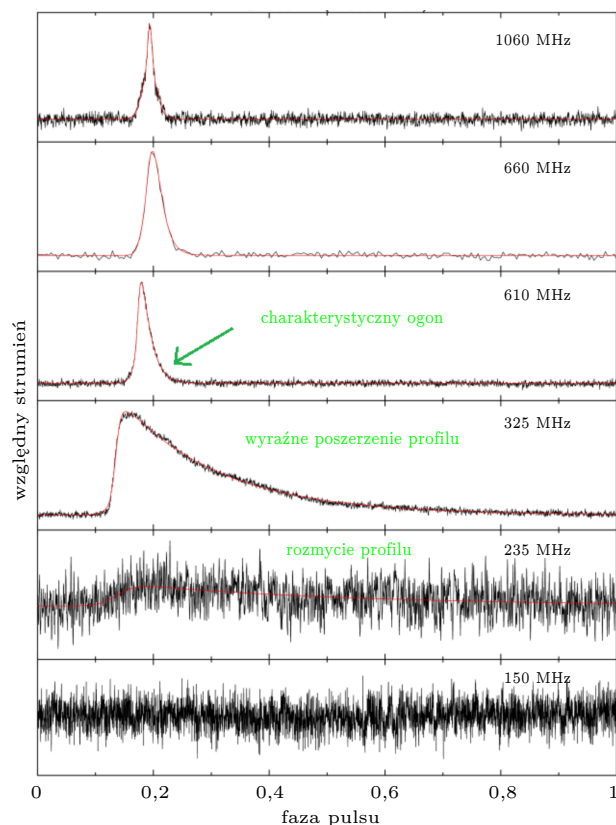
*Instytut Astronomii im. prof. J. Gila,
Uniwersytet Zielonogórski

Karolina ROŹKO*

Gwiazdy neutronowe, o których przeczytać można w pierwszej części mojego artykułu (Δ_{24}^1), okazały się doskonałymi narzędziami do badania najważniejszych teorii fizycznych: we wnętrzu gwiazd neutronowych kluczową rolę odgrywają prawa mechaniki kwantowej, zaś w opisie układów podwójnych tych egzotycznych obiektów nie można pominąć ogólnej teorii względności. Ale zacznijmy od początku...

Obecnie pulsary traktowane są przez większość astrofizyków jako kosmiczne laboratoria oraz narzędzia do badania ośrodka międzygwiazdowego. Gdy promieniowanie radiowe pulsarów napotyka na swojej drodze swobodne elektrony, może ono ulec kilku efektom: dyspersji, rozproszeniu, absorpcji oraz wzmocnieniu/wygaszeniu, czyli tzw. scyntyłacjom. Każdy z wymienionych efektów inaczej manifestuje się obserwacyjnie i pozwala uzyskać inne informacje o ośrodku międzygwiazdowym.

Zjawisko dyspersji zapewne znane jest Czytelnikom dzięki doświadczeniom z pryzmatem: to właśnie ono jest odpowiedzialne za rozszczepienie światła białego na kolorową tęczę. Podobnie zachowuje się ośrodek międzygwiazdowy: fala elektromagnetyczna emitowana przez pulsary będzie miała coraz mniejszą prędkość rozchodzenia się na coraz niższych częstotliwościach. To opóźnienie sygnału mierzone jest przez tzw. miarę dyspersji, a jej wartość pozwala m.in. na oszacowanie odległości do pulsarów, jeśli znamy przybliżony rozkład swobodnych elektronów w galaktyce. Ogólna zależność jest taka: im większa miara dyspersji, tym dalej jest pulsar.



Rys. 1. Wykres pokazujący profile średnie pulsara B0808 – 47: na częstotliwości 1060 MHz profil nie jest zaburzony przez rozpraszanie, na częstotliwości 610 MHz zaczyna być widoczny „ogon” po prawej stronie profilu, na 325 MHz poszerzenie profilu jest już bardzo wyraźne, a na 235 MHz profil prawie całkowicie uległ rozmyciu

Materia międzygwiazdowa nie jest jednak jednorodna i z tego powodu obserwuje się również rozpraszanie promieniowania radiowego. Ponieważ pulsy pojedyncze mogą się znacznie między sobą różnić, najczęściej bada się właśnie profil średni, który powstaje przez uśrednienie odpowiednio dużej liczby pulsów pojedynczych. Co więcej, profil średni jest unikalny dla każdego pulsara, tak jak odcisk palca jest unikalny dla każdego człowieka. Charakterystyczną cechą wpływu rozpraszania promieniowania na profil średni jest pojawianie się „ogona” po prawej stronie profilu wraz ze spadkiem częstotliwości, co można zobaczyć na rysunku 1. Jeśli poszerzenie spowodowane rozpraszaniem sygnału zaczyna przekraczać pojedynczy okres pulsara, można zaobserwować rozsmarowanie sygnału, przez co całkowicie znika on w szumie. Ponadto jeśli na drodze widzenia do pulsara znajduje się zagęszczenie materii międzygwiazdowej, np. w postaci mgławicy wiatru pulsarowego, pozostałości po supernowej lub obszaru H II, to może dojść nawet do absorpcji promieniowania, przez co całkowicie przestajemy obserwować sygnał pulsarów na niskich częstotliwościach, tzn. poniżej 100 MHz.

Z kolei scyntyłacje, czyli wzmocnienie i wygaszenie natężenia sygnału, spowodowane są głównie przez turbulentną naturę ośrodka międzygwiazdowego. Podobne zjawisko obserwujemy, gdy widzimy migotanie gwiazd na niebie będące skutkiem przechodzenia światła przez turbulentne komórki w atmosferze. W przypadku pulsarów wzrosty i spadki natężenia promieniowania występują w dwóch głównych skalach czasowych: jedna jest rzędu kilku minut, druga zaś waha się między kilkoma dniami a kilkoma tygodniami. Ich badanie pozwala ulepszać model rozkładu materii międzygwiazdowej, a w szczególności lokalizować miejsca zagęszczenia tego ośrodka.

Warto jednak zaznaczyć, że niektóre pulsary świecą mniej regularnie, do nich zalicza się m.in. tzw. *intermitted pulsars* oraz RRAT-y (*Rotation RAdio Transient*).

Taylor, J.H.; Weisberg, J.M., 1982, „A new test of general relativity – Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16”, *Astrophysical Journal*, 253: 908.

W projekcie IPTA będzie można wykrywać fale grawitacyjne o częstotliwości w zakresie 10^{-9} – 10^{-8} Hz. Dla porównania detektor LIGO wykrywa fale grawitacyjne o częstotliwości 10–250 Hz.

Wolszczan, A., Frail, D. A., 1992, “A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12”, *Nature*, 355: 145-147.

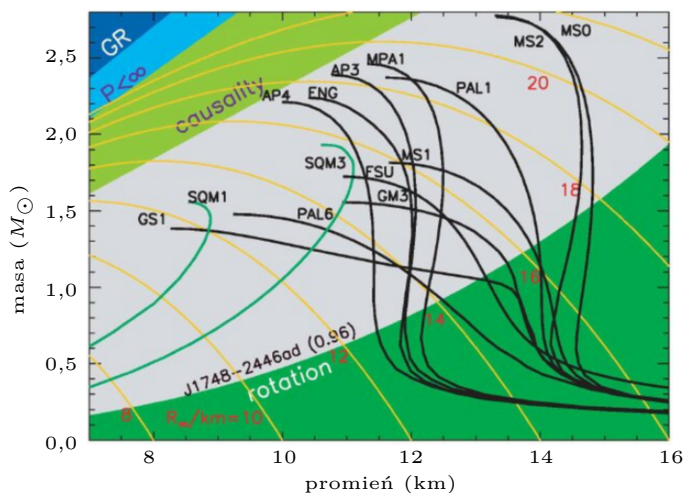
Odkryte przez Wolszczana i Fraila obiekty to bardzo małe planety skaliste, ich masy wynoszą odpowiednio: 0,02 masy Ziemi, 4,3 masy Ziemi oraz 3,9 masy Ziemi.

Gdy podczas obserwacji pulsarów uda się już uwzględnić wszystkie efekty wywołane wpływem materii międzygwiazdowej, otrzymamy niezwykle regularny, powtarzający się sygnał, którego precyzja porównywana jest z najlepszymi zegarami atomowymi na świecie! Tę niezwykłą precyzję wykorzystuje tzw. analiza chronometryczowa, która polega na porównywaniu przewidywanych przez model odstępów czasu między przyjściem kolejnych pulsów oraz odstępów, które rzeczywiście zmierzono (w jęz. ang. TOA – *time of arrival*). Metoda ta jest na tyle skuteczna, że pozwoliła na przetestowanie teorii względności Einsteina oraz na pośrednie obserwacyjne potwierdzenie istnienia fal grawitacyjnych. W 1974 roku Russell Hulse i Joseph Taylor odkryli niezwykle układ podwójny gwiazd, składający się z pulsara i gwiazdy neutronowej krążących wokół wspólnego środka masy. Analiza chronometryczowa sygnału PSR 1913+16 pozwoliła na porównanie zaobserwowanego tempa zacieśniania się orbity układu z przewidywaniami teoretycznymi zakładającymi emisję fal grawitacyjnych przez system. W 1993 roku Hulse i Taylor otrzymali Nagrodę Nobla, gdyż ich odkrycie pozwoliło na rozpoczęcie badania teorii grawitacji w nowatorski sposób.

Obecnie, po bezpośrednim odkryciu fal grawitacyjnych, pulsary po raz kolejny mogą odegrać bardzo interesującą rolę. W ramach projektu IPTA (ang. *International Pulsar Timing Array*) astronomowie na całym świecie wykonują chronometrą dla kilkunastu najbardziej stabilnych pulsarów milisekundowych rozmieszczonych w różnych miejscach Galaktyki. Jeśli przez Galaktykę przechodzi fala grawitacyjna, to wraz ze swoją propagacją powinna ona po kolei opóźniać czasy przyjścia pulsów kolejnych pulsarów milisekundowych. W ten sposób można bezpośrednio wykrywać fale grawitacyjne o niskich częstotliwościach.

Analiza chronometryczowa przyczyniła się też do odkrycia pierwszych planet pozasłonecznych. Na podstawie analizy sygnału radiowego pulsara milisekundowego PSR 1257+12 Aleksander Wolszczan wspólnie z Dalem Frailem w 1992 roku ogłosili odkrycie dwóch planet oraz ewentualnej trzeciej krążących wokół pulsara. Odkrycie to było ogromnym zaskoczeniem, ponieważ nie spodziewano się, że w otoczeniu gwiazd neutronowych mogą istnieć jakiegokolwiek planety. Jest bardzo mało prawdopodobne, aby jakiegokolwiek układ planetarny był w stanie przetrwać wybuch supernowej, zatem odkryte trzy planety powinny powstać już po powstaniu gwiazdy neutronowej. Pewnej wskazówki na temat historii tego niezwykle układu dostarczyły obserwacje układów podwójnych gwiazd neutronowych i brązowych lub białych karłów. Do tej pory w artykule koncentrowaliśmy się na radiowym promieniowaniu pulsarów, tymczasem jedynie około 10% traconej energii rotacyjnej emitowane jest w tym zakresie, większość jest wyświecana w zakresie wysokich energii. I to właśnie silne promieniowanie rentgenowskie i gamma odgrywają ważną rolę w układach podwójnych gwiazd neutronowych: jeśli jest ono zwrócone w kierunku towarzysza, to prowadzi do jego „odparowywania”, a z czasem do całkowitego rozerwania. Takie układy astronomowie nazywają „czarnymi wdowami”, ponieważ gwiazda neutronowa „pożera” swojego towarzysza. To właśnie w takim dysku utworzonym przez materię rozerwanego białego karła mogły powstać odkryte planety wokół PSR 1257+12. Obecnie pulsar ten znany jest pod nazwą Lich (wyłonioną w ramach konkursu Międzynarodowej Unii Astronomicznej) w nawiązaniu do fikcyjnej, nieumarłej postaci. Również nazwy krążących wokół planet nawiązują do różnych duchów i istot paranormalnych, są to: Draugr, Poltergeist i Fobetor.

Mówiąc o gwiazdach neutronowych jako o laboratoriach, nie można nie wspomnieć o badaniach modeli cząstek elementarnych. Tak skompresowanej materii nie jesteśmy w stanie stworzyć w ziemskich laboratoriach, dlatego opracowywanie różnych modeli budowy wnętrza gwiazd neutronowych jest jedynym sposobem studiowania materii w naprawdę ekstremalnych warunkach. Bardzo przydatna jest analiza tzw. równania stanu, wyrażającego związek między parametrami termodynamicznymi układu. W zależności od przyjętego modelu teoretycznego krzywa równania stanu będzie miała inną postać,



Rys. 2. Wykres pokazujący relację promień-masa dla równań stanu gwiazd neutronowych. Pochodzi z publikacji Paerels, F., Mendez, M., Agueros, M. i inni, 2009, „The Behavior of Matter under Extreme Conditions”, White paper submitted to the Astro2010 Decadal survey of Astronomy and Astrophysics

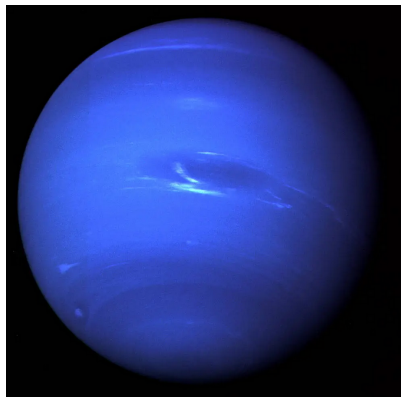
co najlepiej widać na rysunku 2: czarnymi liniami zaznaczono równanie stanu dla zimnej supergęstej materii (czyli dla modelu zwykłej gwiazdy neutronowej), z kolei liniami zielonymi zaznaczono równanie stanu dla tzw. gwiazd dziwnych, czyli zbudowanych z samych kwarków. Poniżej oraz powyżej tych krzywych zaznaczono znane ograniczenia teoretyczne oraz obserwacyjne pozwalające na odrzucenie modeli niemieszczących się w dopuszczalnych zakresach. Do pozostałych badanych modeli należą m.in. model gwiazdy kwarkowo-hybrydowej, model gwiazdy neutronowej z kondensatem pionów, model gwiazdy nukleonowej czy model gwiazdy hyperonowej.

Więcej o pulsarach można przeczytać m.in. w artykule L. Błaskiewicza i W. Lewandowskiego „Zakręcone gwiazdy” opublikowanym w *Uranii – Postęпах Astronomii* nr 2/2019.

Mam nadzieję, że Wasze kosmiczne fartuchy są już wyjęte z szafy i w przyszłości spotkamy się w pulsarowym laboratorium!



Prosto z nieba: Różne odcienie niebieskiego



Zdjęcie Neptuna, do jakiego przywykliśmy, wykonane przez sondę Voyager 2 i opublikowane w 1989 roku

Pod koniec lat 80. zeszłego stulecia sonda Voyager 2 przeleciała w pobliżu Neptuna i wykonała jego zdjęcie. Po prawie 35 latach jest to wciąż jedno z najbardziej rozpoznawalnych zdjęć tej planety. Zdjęcie to jest najczęściej wykorzystywane w mediach i różnego rodzaju prezentacjach Układu Słonecznego. Może więc zaskoczy Cię, drogi Czytelniku, wiadomość, że intensywny niebieski kolor planety nie jest „prawdziwy”. Wzmocniono go po to, aby lepiej uwidocznić drobne detale, w szczególności *chmury* i różne odcienie atmosfery planety. Fakt, że zdjęcie nie przedstawia rzeczywistego koloru Neptuna, był zakomunikowany bardzo wyraźnie w czasie jego publikacji w 1989 roku. Problem w tym, że... zapomnieliśmy o tym „drobnym szczególe”.

Jak to się stało?

Wszystkie zdjęcia wykonane przez sondę Voyager 3 (tak naprawdę wszystkie zdjęcia wykonywane przez jakiegokolwiek teleskopy, nawet współczesne) są w rzeczywistości czarno-białe, a dokładniej – w odcieniach szarości. Detektory rejestrują światło o danej długości fali, a ich natężenie reprezentowane jest właśnie przez różne odcienie szarości. Miejsca, w których tego światła nie ma, pozostają puste, czy też czarne. Sztuczka polega na tym, że to samo zdjęcie wykonywane jest jednocześnie na różnych długościach fal – mówimy, że zdjęcie robi się w określonym filtrze, czyli w ustalonym zakresie długości fali elektromagnetycznej, a zdjęcie końcowe to złożenie wszystkich lub części tych zdjęć. W ten sposób uzyskiwana jest pełna paleta kolorów. Na tej samej zasadzie działa aparat cyfrowy w telefonie. W astronomii nie robimy tego tylko po to, by uzyskać ładne obrazy, ale też po to, aby zaobserwować struktury widoczne w różnych pasmach promieniowania elektromagnetycznego, często poza pasmem widzialnym (np. pył w podczerwieni czy światło pochodzące od młodych jasnych gwiazd w ultrafiolecie).

W kamerze sondy Voyager 2 było pięć filtrów: ultrafioletowy, fioletowy, niebieski, zielony i pomarańczowy. Popularny obraz Neptuna powstał w wyniku złożenia zdjęć z tylko dwóch filtrów: zielonego i pomarańczowego, ponieważ w tych filtrach najlepiej były widoczne chmury i charakterystyczna „niebieska plama”.

Zapewne słyszeliście o systemie RGB (ang. *red-green-blue*, czerwony-zielony-niebieski), w jakim działają aparaty cyfrowe. Zasada jest ta sama. Światło rozszczepiane jest na trzy składowe odpowiadające kolorowi czerwonemu, zielonemu i niebieskiemu. Trzy zdjęcia rejestrowane są osobno, a obraz wynikowy jest ich złożeniem.