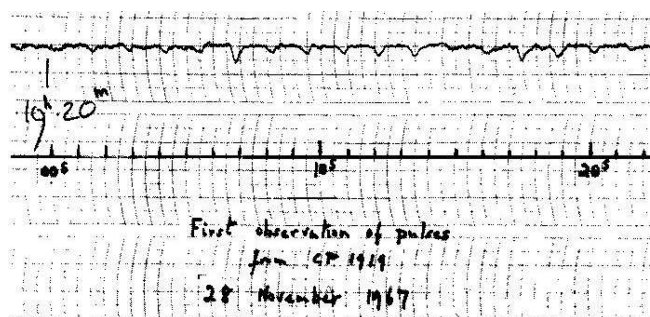


Pulsarowa menażeria

Michał BEJGER

Są tacy, którzy twierdzą, że nie ma nic bardziej ekscytującego niż dreszczyk emocji towarzyszący nieoczekiwanemu odkryciu nowej klasy obiektów astronomicznych. Doskonałym przykładem takiej naukowej „żyły złota”, inspirującej rozwój nowych technik obserwacyjnych, obliczeniowych i stymulującej kolejne pokolenia teoretyków do zadawania pytań o naturę fundamentalnych procesów fizycznych, może być detekcja w 1967 r. okresowego sygnału radiowego o okresie 1,3373 s

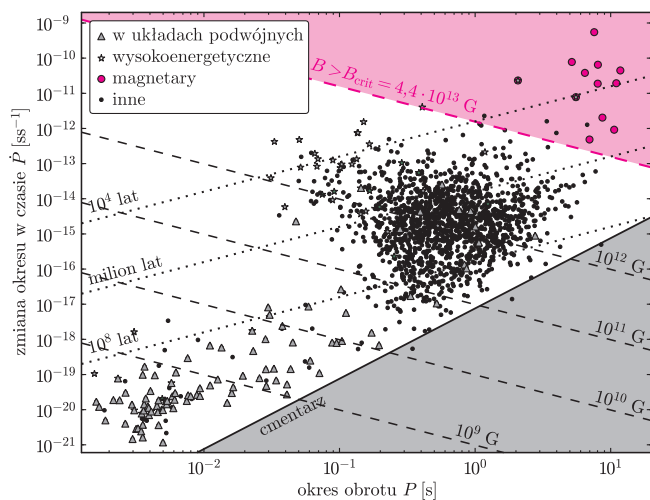


Rys. 1. Historyczny, papierowy wydruk emisji pierwszego pulsara.

– pierwszego *pulsara* (rys. 1). Połączenie słów *pulsating* i *star* charakteryzuje podstawową cechę nowo odkrytych obiektów: niespotykaną nigdy wcześniej regularność sygnału, stabilniejszą w długiej skali czasowej od najlepszych zegarów atomowych. Szczęśliwi, lecz także nieco zakłopotani odkrywcy – Jocelyn Bell i Anthony Hewish – podejrzewali początkowo, że niechcący rejestrują radzieckiego bądź amerykańskiego satelitę szpiegowskiego, brano również pod uwagę możliwość, że sygnał ten pochodził od pozaziemskiej cywilizacji, co znalazło odzwierciedlenie w tymczasowej nazwie pierwszego pulsara: oznaczenie LGM 1 było skrótem od *Little Green Men*. Jeśli jednak nie tworem sztucznym, czym mógłby być ów niecodzienny obiekt? Teoretycy bezwzględnie wykluczyli hipotezę *układu zaćmieniowego*, a także *wibracji powierzchni* gwiazdy – częstość zmian jest bowiem o wiele za wysoka, by wspomniane układy mogły być stabilne – a za jedyne sensowne wytłumaczenie uznano ostatecznie model bardzo gęstego, niewielkiego *obracającego się* obiektu. Obecnie nie ulega wątpliwości, że pulsary są pozostałościami po wybuchach supernowych, *gwiazdami neutronowymi* o masach nieco większych do masy Słońca i promieniach około 10 km, wyposażonymi w silne pole magnetyczne. To właśnie pole magnetyczne odgrywa kluczową rolę w wytwarzaniu sygnału. Otoczenie gwiazdy (jej magnetosfera, o której zakłada się dla uproszczenia, że jest magnetycznym dipolem o osi nachylonej nieco w stosunku do osi rotacji), zawiera plazmę elektronowo-pozytonową; przyspieszane przez siłę Lorentza ładunki wirują wokół linii sił pola, emitując promieniowanie cyklotronowe i promieniowanie hamowania. Zderzenia fotonów produkują z kolei następne pary e^+e^- i tak powstają kaskady elektromagnetyczne, które w okolicach biegunów magnetycznych tworzą snopy promieniowania radiowego omiatające przestrzeń w takt obrotu pulsara, na podobieństwo latarni

morskiej (gwoli ścisłości należy jednak przyznać, że szczegóły budowy i działania magnetosfer nie są, ponad 40 lat po odkryciu, zrozumiane w sposób zadowalający).

Współczesna technika chronometrażu umożliwia pomiar czasu nadejścia sygnału z niemal nieograniczoną dokładnością (nawiasem mówiąc, jest to jedna z niewielu obserwowanych wielkości, jakie astronom może porządnie zmierzyć). Rysunek 2 przedstawia zależność okresu obrotu P od prędkości zmian okresu \dot{P} dla galaktycznej populacji pulsarów. Znajdziemy wśród nich takie, które obracają się ponad pół tysiąca razy na sekundę. Obecny rekord częstotliwości, 716 Hz, należy do PSR J1748-2446ad odkrytego w 2005 roku (gdyby próżnia przewodziła dźwięk, słyszelibyśmy go w skali równomiernie temperowanej w okolicach tonu F^4). Znane są też



Rys. 2. Diagram okresu obrotu-pochodna okresu (P - \dot{P}), na którym zaznaczono różne podklasy obecnie znanych pulsarów.

wolno rotujące obiekty o okresach rzędu kilku sekund. Jak wynika z rysunku 2, dla wszystkich pulsarów zmiana okresu \dot{P} jest dodatnia, czyli okres P rośnie. Dzieje się tak dlatego, że emisja promieniowania odbiera gwiazdzie energię kinetyczną. Znajomość P i \dot{P} pozwala oszacować (szczegółowy wyprowadzenia pomijamy) dipolowe pole magnetyczne danego pulsara,

$$(1) \quad B \simeq 3,2 \times 10^{19} (P\dot{P}/s)^{1/2} \text{ [G]},$$

a także otrzymać jego *wiek charakterystyczny*

$$\tau \approx \frac{P}{2\dot{P}} \text{ [s]}.$$

Na przykład, dla pulsara w mgławicy Kraba, dla którego obecnie $P = 0,033$ s, $\dot{P} = 10^{-12,4}$, wiek charakterystyczny τ wynosi około 1300 lat. Ponieważ wiadomo skądinąd, że jego prawdziwy wiek to 957 lat (wybuch supernowej Kraba był obserwowany przez chińskich astronomów w 1054 r.), nie jest to dokładność oszałamiająca, zawsze jednak lepsze takie oszacowanie niż żadne.

Linie stałego B i τ zaznaczone są na rysunku 2, odpowiednio przerywanymi i kropkowanymi liniami. Pulsar zaczyna swe życie z okresem $P \simeq 20$ ms, po czym, stopniowo zwalniając, zmierza w dół diagramu $P\dot{P}$ zachowując mniej więcej stałe pole magnetyczne. Powolna rotacja prowadzi jednak do stopniowego zaniku mechanizmu pulsu radiowego – i oniemiały pulsar trafia w obszar diagramu zwany Cmentarzem. Jeśli jednak jakimś cudem uda mu się spotkać zaciego towarzysza (tj. stać się składnikiem układu podwójnego), ten może uratować go z opresji i przywrócić głos, stosując tzw. recykling akrecyjny. W lewej dolnej części rysunku 2 widzimy grupę szybko rotujących pulsarów, występujących głównie w układach podwójnych – to właśnie rozkręcone przez akrecję rekordzistki szybkości, bardzo stare gwiazdy neutronowe o polu magnetycznym mocno osłabionym przez procesy akrecyjne. Gwiazdy w układach podwójnych przodują także w jasności: Scorpius X-1, pierwsze astrofizyczne źródło promieniowania rentgenowskiego, odkryte przez zespół Riccardo Giacconiego w 1962 r. (nagroda Nobla w 2002 r.), jest najjaśniejsze na całym niebie. Niejako przeciwieństwem pulsarów milisekundowych są magnetary (prawy górny róg rysunku 2), mające pola magnetyczne o 2–3 rzędy wielkości przewyższające średnią wartość 10^{12} G dla pulsarów, sekundowe okresy obrotu, które szybko się wydłużają (duże \dot{P}), są one też prawdopodobnie dość młode. Magnetary od zwykłych pulsarów radiowych oddziela linia $B_{\text{crit}} = m_e^2 c^3 / \hbar e = 4,4 \cdot 10^{13}$ G, odpowiadająca *polu krytycznemu Schwingera*. Dla $B > B_{\text{crit}}$ efekty kwantowe związane z oddziaływaniem fotonów z polem magnetycznym stają się istotne, co

prowadzi do spadku produkcji par e^+e^- , przeważająca większość magnetarów jest więc radiowo cicha. Model magnetara stworzono w celu wyjaśnienia obserwacji obiektów emitujących powtarzające się błyski miękkiego promieniowania γ (SGR, *Soft Gamma Repeaters*) oraz anomalnych pulsarów rentgenowskich (AXP, *Anomalous X-ray Pulsars*). Pierwsze z wymienionych obiektów charakteryzują się niezbyt częstymi, ale potężnymi wybuchami, zdolnymi „oślepić” wszelkie satelity badawcze i znacząco obniżyć granicę ziemskiej jonosfery. AXP emitują natomiast pulsy promieniowania rentgenowskiego, których zakresu energetycznego nie da się wytłumaczyć za pomocą modelu pulsara o typowym polu magnetycznym i charakterystycznych dla magnetarów wartości P (stąd określenie *anomalny*).

Zgłębianie tajemnic pulsarów wymaga zastosowania prawie każdej z dziedzin nowoczesnej fizyki. Nagrodą za trudy jest jednak ciekawie rozwijająca się gałąź wiedzy i niewyczerpane źródło inspiracji nie tylko naukowych – przykładem słynny album grupy Joy Division (o znamionym tytule *Unknown pleasures*), którego okładka przedstawia sekwencję pulsów pierwszego pulsara.



Rys. 3. Okładka albumu *Unknown Pleasures* zespołu Joy Division, przedstawiająca ciąg pulsów PSR B1919+21.