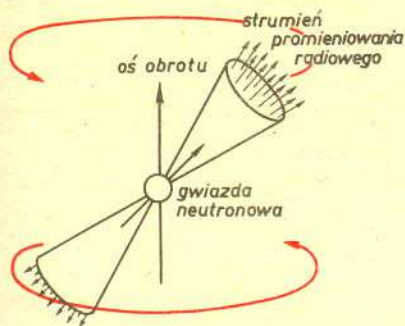


Rys. 1 Gwiazda neutronowa z dipolowym polem magnetycznym nachylnym względem osi obrotu



Rys. 2 Wirująca gwiazda neutronowa ze strumieniami promieniowania

Pulsary są wirującymi gwiazdami neutronowymi, obdarzonymi bardzo silnym polem magnetycznym. Gwiazdy neutronowe powstają w wyniku zapadnięcia się centralnej części zwykłych, masywnych gwiazd, gdy te kończą swe życie wybuchając jako supernowe. Gwiazdy neutronowe są obiektami o promieniu kilku, najwyżej kilkunastu kilometrów i o masie bliskiej masie Słońca, co oznacza, że średnia gęstość materii w ich wnętrzu przewyższa gęstość materii w jądrach atomów.

Pulsar — wedle przyjętego dziś modelu — ma bardzo silne pole magnetyczne o strukturze mniej więcej dipolowej, przy czym oś pola nachylona jest względem osi obrotu gwiazdy neutronowej. Nad obydwoma biegunami magnetycznymi, nad powierzchnią gwiazdy, powstają wąskie strumienie naładowanych cząstek, poruszających się na zewnątrz z prędkościami bliskimi prędkości światła. Cząstki te promieniują w kierunku ruchu i w rezultacie nad biegunami powstają wąskie strumienie promieniowania radiowego skierowane na zewnątrz, wzdłuż osi pola magnetycznego. W przypadku kilku pulsarów — strumieniom promieniowania radiowego towarzyszą strumienie światła widzialnego, promieni Roentgena i promieni gamma.

Owe strumienie omiatają niebo w miarę obracania się gwiazdy neutronowej wokół swojej osi. W chwili, gdy któryś z nich zahacza o Ziemię, odbieramy sygnał z pulsara. Oczywiście, są i takie pulsary, które omiatając niebo swoim promieniowaniem nie natrafiają na Ziemię — takich pulsarów nie możemy dostrzec. Szacuje się, że ledwie jeden pulsar na pięć omiatając niebo zahacza przy tym o Ziemię.

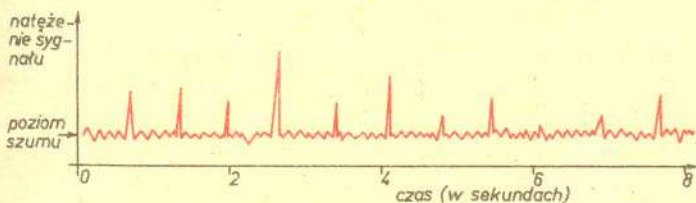
Pierwszy pulsar został odkryty pod koniec roku 1967 i miał okres $P = 1,33730$ s. Dzisiaj, po piętnastu latach, znamy 333 pulsary. Najmłodszy pulsar, tkwiący w środku Mgławicy Krab w gwiazdozbiore Byka, ma 929 lat i okres $P = 0,03313$ s (tylko jeden pulsar wiruje szybciej od niego). Wiek przeciętnego pulsara sięga kilku milionów lat, a więc jest znacznie krótszy od czasu istnienia naszej Galaktyki, a nawet Układu Słonecznego. Oznacza to, że pulsary umierają. Mechanizm fizyczny generujący strumienie cząstek nad biegunami gwiazdy neutronowej działa przez kilkanaście, najwyżej kilkadziesiąt milionów lat po jej narodzeniu. Później przestaje. Gwiazda neutronowa przestaje wysyłać strumienie kierunkowego promieniowania — przestaje być pulsarem.

Nieciągłości w wirowaniu pulsarów



Dr Mieczysław PRÓSZYŃSKI

Pulsary pulsują. Sygnał odbierany przez radioteleskop ma postać bardzo regularnie powtarzających się impulsów: natężenie wzrasta do wartości maksymalnej, spada do poziomu szumu, następnie przez pewien czas sygnału nie ma, po czym wszystko powtarza się od początku. Cały cykl u najszybszego pulsara trwa 0,00155 s, u najwolniejszego 4,308 s, a u przeciętnego około jednej sekundy.



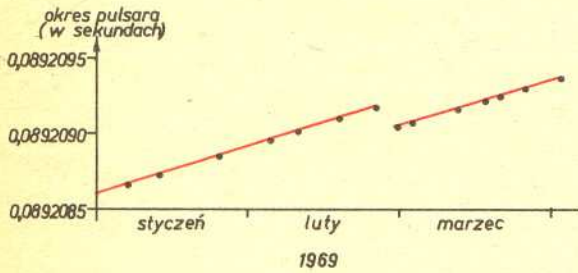
Rys. 3 Sekwencja pulsów odebranych z jednego z najwcześniej odkrytych pulsarów, PSR 0329 + 54. Odstęp między kolejnymi pulsami wynosi 0,714 s.

Pulsary pulsują. Przypominają cykające zegary.

W rzeczywistości pulsary są bardzo dobrymi zegarami. Mechanizmem, który odpowiada za regularne powtarzanie się sygnału, jest ruch obrotowy gwiazdy neutronowej. Puls obserwujemy w chwili, gdy zahacza o nas wąski strumień promieniowania radiowego wysyłany z jednego z biegunów magnetycznych gwiazdy neutronowej. Sercem pulsara jest więc wirująca gwiazda neutronowa, a okres pulsara (odstęp między kolejnymi maksimami sygnału) to okres obrotu gwiazdy neutronowej. W ten sposób z zachowania się okresu pulsara można wnioskować o własnościach gwiazd neutronowych, o ich budowie wewnętrznej, o polu magnetycznym.

Pulsary są bardzo dobrymi zegarami, nie są jednak zegarami idealnymi. Okres pulsara zmienia się z biegiem czasu. Przede wszystkim zegar zwalnia, spóźnia się; okres między kolejnymi pulsami wydłuża się. Są to zmiany powolne. W ciągu roku okres przeciętnego pulsara wydłuża się o $5 \cdot 10^{-7}$ swojej wartości. Te powolne zmiany są zmianami systematycznymi, to znaczy przewidywalnymi. Zegar co prawda zwalnia, lecz można prawidłowo przewidzieć szybkość jego chodu za rok czy dwa. To systematyczne spowalnianie ruchu obrotowego gwiazdy neutronowej związane jest z obecnością pola magnetycznego.

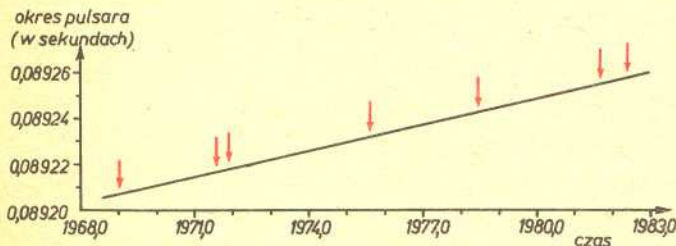
Wyobraźmy sobie wirujący dipol magnetyczny nachylony względem osi obrotu. Dipol taki promieniuje we wszystkich kierunkach monochromatyczną falę elektromagnetyczną o częstotliwości równej częstotliwości wirowania i natężeniu największym w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu. Fala ta unosi energię. Dzieje się to kosztem energii ruchu obrotowego i jeśli nie będziemy mu jej uzupełniać (np. za pomocą silniczka), to dipol będzie zwalniał. Tak samo dzieje się z gwiazdami neutronowymi; oprócz wąskich, lecz bardzo mocnych strumieni promieniowania, skierowanych wzdłuż osi magnetycznej, pulsar wysyła „zwykłą” monochromatyczną falę elektromagnetyczną o częstotliwości równej częstotliwości wirowania gwiazdy. Śmieszne jest przy tym to, że energia wypromieniowywana przez pulsar w postaci snopu promieniowania, który powoduje pulsowanie sygnału w radioteleskopie, jest bardzo mała w porównaniu z energią traconą w postaci „zwykłego” promieniowania, wysyłanego przez wirujące pole magnetyczne pulsara. Tego „zwykłego” promieniowania nie możemy zaobserwować na Ziemi, bo jego natężenie jest znacznie słabsze.



Rys. 4 Nieciągłość okresu pulsara w Żaglu (PSR 0833—45) na przełomie lutego i marca 1969 r. Punkty oznaczają kolejne obserwacje. Dokładny moment skoku nie jest znany.

Szybkość utraty energii, a więc i tempo zmian okresu pulsara zależy od wartości momentu dipolowego pola magnetycznego pulsara (a dokładniej od składowej tego momentu prostopadłej do osi obrotu) i nie zmienia się w sposób znaczący z roku na rok. Dlatego też mówimy, że owo wydłużanie się okresu jest systematyczne i przewidywalne; można przedstawić je przy pomocy wzoru $P(t) = P_0 + \dot{P}_0 \cdot (t - t_0)$, gdzie P_0 i \dot{P}_0 są odpowiednio okresem i pochodną okresu w chwili t_0 .

Jednym z pierwszych odkrytych pulsarów był pulsar o okresie $P = 0,0892$ s, znajdujący się w pobliżu środka wielkiej pozostałości po wybuchu supernowej w gwiazdozbiornie Żagla. Przez kilka pierwszych miesięcy po odkryciu pulsar ten zachowywał się przyzwoicie. Jego okres systematycznie rósł; w ciągu każdej doby wydłużał się o $1,07 \cdot 10^{-8}$ s. Na przełomie lutego i marca 1969 roku zegar pulsara nagle przyspieszył — gwiazda neutronowa zaczęła wirować szybciej. Okres obrotu zmalał o $-\Delta P = 2,08 \cdot 10^{-7}$ s, co odpowiada względnej zmianie $\Delta P/P = -2,34 \cdot 10^{-6}$. Aby „odrobić” ten



Rys. 5 Systematyczne wydłużanie się okresu pulsara w Żaglu, PSR 0833—45. Chwile, w których nastąpiły skoki okresu, zostały zaznaczone strzałkami. Same nieciągłości są zbyt małe, by można je było dostrzec na tym rysunku. Data 1968,0 oznacza początek roku 1968 itd.

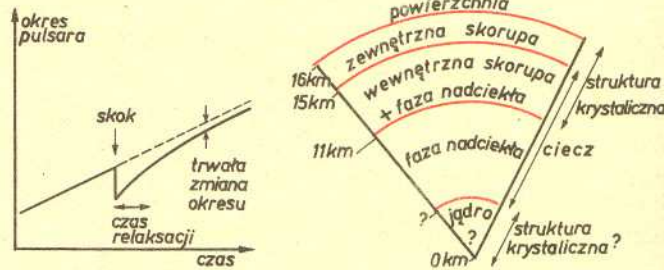
skok i powrócić do okresu takiego, jaki miał bezpośrednio przed skokiem, pulsar musi systematycznie zwalniać przez 18,6 dnia. Następny skok nastąpił we wrześniu 1971 roku, po 2,5 latach systematycznego zwalniania; znów okres pulsara nagle zmalał. Nieco później, na przełomie 1971 i 1972 roku zaobserwowano kolejny skok, tym razem przeszło 100 razy mniejszy od poprzednich. W następnych latach były jeszcze cztery duże skoki okresu, w 1975, 1978, 1981 i 1982 — wszystkie o podobnej wielkości, $\Delta P/P$ wahało się między $-1 \cdot 10^{-6}$ a $-3 \cdot 10^{-6}$.

Zauważono kilka podobnych skoków okresu u najmłodszego pulsara, znajdującego się w środku Mgławicy Krab, pozostałości po wybuchu supernowej z roku 1054. Okres tego pulsara, $P = 0,03313$ s, w ciągu każdej doby systematycznie wydłuża się o $3,6 \cdot 10^{-8}$ s; w ciągu 10 lat obserwacji wydłużył się o 0,4%. Pierwszy skok okresu zarejestrowano u tego pulsara we wrześniu 1969 roku, dwa następne, bardzo małe w 1971 roku, kolejny — największy do dziś — w lutym 1975 roku i jeszcze jeden mały w 1978 roku. W czasie największego skoku okres zmalał o $-\Delta P = 1,3 \cdot 10^{-9}$ s, co odpowiada względnej zmianie $\Delta P/P = -4 \cdot 10^{-8}$. Efekt był więc pięćdziesiąt razy słabszy niż w przypadku pulsara w Żaglu.

Trzecim i ostatnim do tej pory pulsarem, u którego zaobserwowano nieciągłości w systematycznym wydłużaniu się okresu, jest obiekt oznaczany symbolem PSR 1641—45. Skok nastąpił we wrześniu 1977 roku i wyniósł $\Delta P/P = -1,9 \cdot 10^{-7}$.

We wszystkich powyższych przypadkach nieciągłość polegała na tym, że okres nagle malał; po skoku gwiazda neutronowa zaczynała wirować nieco szybciej. We wszystkich tych przypadkach powolne, systematyczne zmiany w czasie między skokami były znacznie większe — skoki objawiały się jako małe zaburzenia w dominującym zwalnianiu.

Zauważono, że bezpośrednio po skoku pulsar zachowuje się dziwnie, tak jakby chciał wytracić przynajmniej część z tego, co nagle zyskał (rys. 6).



Rys. 6 Zachowanie się okresu po skoku Rys. 7 Gwiazda neutronowa — przekrój

Jaka jest bezpośrednia przyczyna tych nieciągłości okresu? Do tej pory nie znamy odpowiedzi na to pytanie. Astronomowie i astrofizycy wymyślili wiele różnych mechanizmów tłumaczących te skoki, jednakże żaden nie jest w pełni zadowalający, żaden nie wyjaśnia wszystkich obserwowanych szczegółów.

Gwiazda neutronowa — wedle najprostszego, dwuskładnikowego modelu — składa się z krystalicznej, zewnętrznej skorupy oraz z neutronowej cieczy wewnątrz. Być może w cieczy, w środku, tkwi jeszcze krystaliczne jądro. Obrazek ten przypomina w sumie jajko, tyle tylko, że gwiazda ma grubszą skorupkę, jest elipsoidą obrotową lekko spłaszczoną na biegunach (odchylenie od kulistości spowodowane jest ruchem obrotowym) i nie wiadomo, czy na pewno w środku jest żółtko. W cieczy neutronowej znajdują się również cząstki naładowane, elektrony i protony; stanowią one kilka procent masy cieczy. Liczba elektronów jest dokładnie równa liczbie protonów, a więc cała ciecz nie ma ładunku elektrycznego netto. Neutrony w cieczy są w stanie nadciekłym, cząstki naładowane — nie.

Być może przyczyną skoku jest nagle pęknięcie skorupy gwiazdy neutronowej, która następnie stara się ułożyć zgodnie z kształtem chwilowej powierzchni ekwipotencjalnej „efektywnego” pola grawitacyjnego gwiazdy. To efektywne pole jest sumą dwóch pól: *pola grawitacyjnego* wytwarzanego przez gwiazdę i *pola siły bezwładności* (odśrodkowej), związanej z ruchem obrotowym gwiazdy. Powierzchnia stałego potencjału ma kształt elipsoidy obrotowej spłaszczonej wzdłuż osi obrotu, przy czym stopień spłaszczenia zależy od prędkości obrotu i zmniejsza się w miarę, jak maleje prędkość obrotu, a więc wtedy, gdy okres się wydłuża. Skorupa gwiazdy — struktura krystaliczna — nie odkształca się w sposób ciągły w miarę zmian kształtu powierzchni ekwipotencjalnej, stawia opór. W rezultacie w skorupie pojawiają się naprężenia, które narastają i po pewnym czasie dochodzi do kataklizmu, skorupa nagle pęka i przemieszcza się, starając jak najlepiej się dopasować do chwilowej powierzchni ekwipotencjalnej. Spłaszczenie maleje, toteż maleje i moment bezwładności skorupy. Ponieważ jednak ilość momentu pędu skorupy nie zmalała w czasie zmiany kształtu, przypada go teraz nieco więcej na jednostkę momentu bezwładności, a więc skorupa musi zacząć wirować nieco szybciej. Oto i skokowy wzrost prędkości obrotu, czyli nagle skrócenie okresu.

Nasz prosty model — wymyślony w 1969 roku przez Bayma, Pethicka, Pinesa i Rudermana — bardzo dobrze wyjaśnia skoki okresu w przypadku pulsara z Mgławicy Krab. Niestety, w przypadku pulsara w Żaglu skoki są zbyt duże i zdarzają się zbyt często. W ciągu kilku lat, jakie mijają między kolejnymi skokami, zmiana kształtu powierzchni ekwipotencjalnej jest przeszło tysiąc razy za mała, by spowodować skok o obserwowanej wielkości. Nasz model mógłby wytłumaczyć pojawienie się w ciągu całego życia pulsara kilkunastu, najwyżej kilkudziesięciu skoków o obserwowanej wielkości. My zaś widzieliśmy aż 6 w ciągu 14 lat.

Można zmodyfikować nieco nasz model przyjmując, że skoki powodowane są przez pęknięcia wewnątrz wielkiego krystalicznego jądra gwiazdy neutronowej, nie zaś skorupy, jak przyjmowaliśmy dotąd. Ta wersja jest lepsza, bowiem takie jądro może być znacznie bardziej spłaszczone, niż wynikałoby to z obecnej prędkości wirowania, i każde kolejne pęknięcie może tylko odrobinę zbliżyć jego kształt do kształtu równowagowego (to znaczy kształtu odpowiedniej powierzchni ekwipotencjalnej). Niestety, nie ma żadnych dowodów na to, że takie krystaliczne jądra rzeczywiście istnieją wewnątrz gwiazd neutronowych.

Inną przyczyną skoku może być niestabilność hydrodynamiczna pojawiająca się nagle na granicy fazy nadciekłej i skorupy. W przypadku pulsara z Mgławicy Krab przyczyną skoku może być też niestabilność w obszarze magnetosfery, objawiająca się jako nagle uwolnienie części plazmy uwięzionej w polu magnetycznym pulsara i wirującej wraz z nim. Nie można wykluczyć, iż mimo podobnych objawów skoki okresu są u różnych pulsarów powodowane przez różne mechanizmy fizyczne.

Chociaż obecny stan wiedzy nie pozwala jednoznacznie wyjaśnić, *dlaczego* występują nagle skoki i na ogół „gładkim” zwalnianiu wirowania pulsarów, obecny model gwiazdy neutronowej zupełnie nieźle tłumaczy to, co się po takim skoku dzieje.

Nieciągłość w wirowaniu gwiazdy neutronowej to w rzeczywistości nieciągłość w prędkości obrotu strumienia promieniowania, a więc pola magnetycznego i skorupy, w którą to pole jest wmrózone; z jakiegoś (nieznanego do końca) powodu skorupa, pole magnetyczne i w ogóle cała zewnętrzna magnetosfera, a także cząstki naładowane znajdujące się

w ciekłym wnętrzu, które też są wmrózone w pole, i krystaliczne jądro (jeśli istnieje) — wszystkie te składniki zaczynają się nagle obracać szybciej. Natomiast nadciekła część gwiazdy nie reaguje na tę zmianę natychmiast, wiruje z poprzednią prędkością.

W rezultacie zmienia się moment siły tarcia między wnętrzem a skorupą — w pierwszym przybliżeniu jest on proporcjonalny do różnicy prędkości obu faz. Moment siły działa cały czas, wnętrze bowiem przez cały czas wiruje nieco szybciej niż skorupa. (Faza nadciekła musi wirować szybciej niż skorupa, gdyż to skorupa jest ciągle hamowana przez promieniujący dipol, faza nadciekła zaś jest hamowana jedynie przez oddziaływanie, które pojawia się między nią a skorupą tylko wtedy, gdy występuje różnica prędkości). Skok powoduje zmianę względnej prędkości skorupy względem fazy nadciekłej. W momencie skoku stan równowagi zostaje zachwiany, zmienia się różnica prędkości, zmienia się więc też i oddziaływanie hamujące ruch fazy nadciekłej, a przyspieszające skorupę. Układ dąży do odzyskania stanu równowagi. Skorupa oddaje nadmiar swojego momentu pędu dopóty, dopóki różnica prędkości nie wróci do wartości sprzed skoku. Ten mechanizm „neutralizuje” część początkowego skoku prędkości wirowania skorupy. A to, jaka część początkowego skoku zostanie zneutralizowana, zależy od stosunku momentu bezwładności fazy nadciekłej do momentu bezwładności całego pulsara.

Oczywiście, nie ma powodu, by owo przekazywanie nadmiaru momentu pędu ze skorupy do wnętrza miało się odbywać równie szybko, jak inicjujący je skok. W rzeczywistości przebiegu skoku nie udało się do tej pory zaobserwować — zwykle obserwacje przeprowadzane są co kilka dni i analizując kolejną ich porcję stwierdza się, że właśnie coś się zmieniło od poprzedniego razu, że pulsar wiruje szybciej, niż by to wynikało z poprzednich obserwacji i że wobec tego od czasu ostatniej obserwacji musiał zdarzyć się skok. Natomiast *proces relaksacji* — wzajemnego uzgadniania się prędkości wirowania skorupy i nadciekłego wnętrza — może trwać kilka dni (przypadek pulsara z Mgławicy Krab), kilkaset (przypadek pulsara w Żaglu) lub jeszcze dłużej. Czasy relaksacji mogą się tak bardzo różnić w przypadku różnych pulsarów, gdyż moment siły działający między skorupą a wnętrzem zależy także od temperatury fazy nadciekłej, która zmienia się z biegiem czasu i im pulsar jest starszy, tym jest niższa. Może zdarzyć się i tak, że stan równowagi po skoku nigdy nie jest osiągnięty, gdyż wcześniej następuje kolejny skok.

Pulsary nie oszczędzą nam zagadek. W 1975 roku podczas największego do dzisiaj skoku okresu u pulsara z Mgławicy Krab skokowo zmieniło się również tempo zwalniania ruchu wirowego. Od tej pory pulsar zwalnia szybciej; pochodna okresu — wielkość, która charakteryzuje szybkość zwalniania — wzrosła o $2,2 \cdot 10^{-4}$ swojej wartości. Najprawdopodobniej w czasie skoku zmienił się nagle moment dipolowy pola magnetycznego, a dokładniej — jego składowa prostopadła do osi obrotu, gdyż to jej obecność powoduje utratę energii ruchu wirowego. Być może w czasie skoku pole magnetyczne zmieniło nieco swoje ustawienie względem gwiazdy w taki sposób, że wzrósł kąt między osią pola i osią obrotu tak, iż wzrosła składowa momentu dipolowego prostopadła do osi obrotu.

Niektóre pulsary cierpią prócz tego na ciągle zaburzenia wirowania. Na dominujące, systematyczne wydłużanie się okresu nakładają się niewielkie fluktuacje — okres błądzi wokół wartości przewidywanej, raz jest nieco za mały, raz za duży. Jednym z takich chorych pulsarów jest znany nam już pulsar z Mgławicy Krab. Zmiany te związane są niewątpliwie z jakimś procesem przypadkowym. Być może jest to wynik sumowania się wielu bardzo małych skoków okresu, które zdarzają się tak często, że nie jesteśmy w stanie zobaczyć efektu poszczególnych skoków.