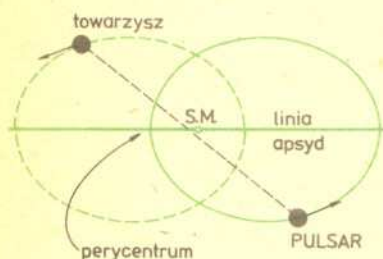


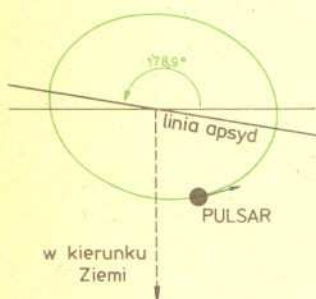
O „podwójnym” pulsarze i efektach relatywistycznych

Mgr Mieczysław PRÓSZYŃSKI



Rys. 1. Układ podwójny. Oba składniki układu krążą wokół środka masy. Perycentrum jest punktem orbity leżącym najbliżej środka masy.

Ustawienie orbity pulsara względem Ziemi w dniu 1.10.1974



Ustawienie orbity pulsara względem Ziemi w dniu 1.01.1980



Rys. 2. Ruch linii apsyd.

1. ODKRYCIE

Historia „podwójnego” pulsara ma swój początek w roku 1974, gdy dwaj astronomowie amerykańscy, R. A. Hulse i J. H. Taylor, rozpoczęli jedno z wielkich poszukiwań pulsarów. W czasie tych łowów, prowadzonych przy pomocy radioteleskopu i komputera, zauważyli, że odstępy między kolejnymi pulsami przychodzącymi z jednego z nowo odkrytych obiektów nie są stałe, lecz zmieniają się cyklicznie, z okresem niecałych ośmiu godzin. Był to pulsar związany w ciasny układ podwójny z inną, niewidoczną gwiazdą. Otrzymał on symbol PSR 1913+16; PSR jest skrótem słowa pulsar, a 1913+16 określa jego położenie na sferze niebieskiej. Oba składniki tego układu podwójnego obiegają się w ciągu 7 godzin i 45 minut we wzajemnej odległości w przybliżeniu równej średnicy Słońca. Odkrycia innych pulsarów z towarzyszącymi oczekiwano w czasie wszystkich późniejszych „polowań na pulsary”. Ostatnio znaleziono jeszcze jeden taki układ podwójny. Tym razem jedno okążenie trwa około 1700 dni. Od momentu odkrycia składniki przebiegły ledwie 1/3 pełnego okążenia.

Ocenia się, że 60% gwiazd w Galaktyce jest związanych w układach wielokrotnych (złożonych z dwóch lub więcej gwiazd). Spośród 323 znanych nam pulsarów tylko dwa mają towarzyszy. Najwyraźniej więc wolą one samotność. Dzieje się tak prawdopodobnie dlatego, że układy podwójne, w których jeden ze składników przeszedł przez fazę czerwonego olbrzyma i wybuchu supernowej stając się gwiazdą neutronową, nie zapewniają na ogół warunków, by owa gwiazda neutronowa mogła stać się pulsarem radiowym. Nawet mała ilość materii uciekająca z atmosfery aktywnego towarzysza i osadzająca się na gwiazdzie neutronowej zanieczyszcza jej okolice na tyle, by proces, w którym powstaje emisja radiowa, nie mógł zachodzić. Wróćmy jednak do PSR 1913+16. Badając odstępy między poszczególnymi pulsami przychodzącymi z PSR 1913+16 można bardzo dokładnie określić kształt orbity, po której krąży on wokół środka masy układu pulsar + towarzysz. Podczas swego ruchu orbitalnego pulsar to przybliża się nieco do Ziemi, to oddala. Odstępy między odbieranymi pulsami są krótsze, gdy pulsar w momencie ich wysłania poruszał się ku nam, a dłuższe, gdy poruszał się od nas. Jest to efekt Dopplera. I choć odległości do pulsara nie umiemy wyznaczyć zbyt dokładnie (wynosi ona około 6,2 kpc czyli $1,9 \times 10^{17}$ km), jej okresowe zmiany mierzy się dzisiaj z dokładnością do 15 km!

Już z pierwszych pomiarów wynikało, że PSR 1913+16 porusza się po elipsie bardzo spłaszczonej o dłuższej osi w przybliżeniu równej średnicy Słońca. Gdyby gwiazda-towarzysz była gwiazdą dużą, to pulsar w trakcie swego ruchu orbitalnego powinien na pewien czas chować się za nią. A ponieważ żadnych pulsów nie brakuje (czyli nie ma zaćmień pulsara), wnioskujemy, iż drugi składnik systemu ma niewielkie rozmiary, czyli jest gwiazdą gęstą. Najprawdopodobniej jest to również gwiazda neutronowa. Dopuszczalnymi kandydatami są jeszcze: gwiazda helowa lub szybko wirujący biały karzeł, początkowo brano również pod uwagę czarną dziurę.

2. LABORATORIUM DO BADANIA EFEKTÓW RELATYWISTYCZNYCH

Jednym z trzech słynnych eksperymentalnych testów ogólnej teorii względności był ruch perihelium Merkurego. Elipsa, po której Merkury krąży wokół Słońca, zmienia powoli orientację swych osi — obraca się. Jej dłuższa oś, zwana linią apsyd, w ciągu każdych stu lat przesuwa się o kąt $1142'' = 0,31722^\circ$. Z tego 1099'' można wyjaśnić wpływem innych planet (korzystając z teorii grawitacji Newtona). Obrót o pozostałe 43'', a dokładniej o $43'' \pm 0,4''$, wytłumaczył dopiero Albert Einstein przy pomocy swojej teorii względności.

Podobny efekt — tyle, że kilkadziesiąt tysięcy razy silniejszy — powinien wystąpić także w wypadku naszego „podwójnego” pulsara. Przychodzące pulsy pozwalają bardzo dokładnie wyznaczyć wszelkie zmiany orbity. Jeśli drugi składnik układu podwójnego jest gwiazdą neutronową, to trudno marzyć o lepszym laboratorium do badania efektów relatywistycznych i testowania teorii grawitacji. Gdyby jednak był to biały karzeł lub gwiazda helowa, a więc ciała o rozmiarach znacznie większych od gwiazdy neutronowej, to efekty relatywistyczne mieszałyby się z dodatkowymi efektami klasycznymi. „Relatywistyczny” obrót elipsy sumowałby się z „klasycznym” obrotem wynikającym z odkształceń powierzchni gwiazdy-towarzysza bądź to przez pole grawitacyjne pulsara (fale pływowe — w wypadku gwiazdy helowej), bądź to przez szybką rotację (elipsoida obrotowa zamiast kuli — w wypadku białego karła).

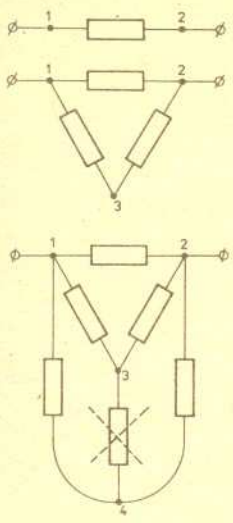
3. FALE GRAWITACYJNE?

Dzisiaj, po sześciu latach obserwacji prowadzonych w tym niezwykłym laboratorium, prawie wszystko wskazuje na to, iż drugi składnik jest również gwiazdą neutronową. Z a k l a d a j a c, że tak rzeczywiście jest, można określić masy obu gwiazd — pulsara i towarzysza. Wynoszą one odpowiednio 1,3 i 1,5 masy Słońca. Byłby to pierwszy bezpośredni pomiar masy gwiazdy neutronowej.

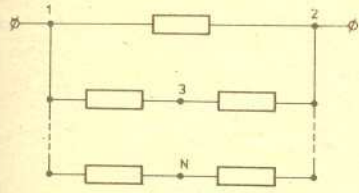
I wreszcie najważniejsze: w ciągu tych pięciu lat stwierdzono, że oprócz przewidywanego obrotu elipsy (pomiar dał tu $4,226^\circ$ na rok), zmieniają się również jej rozmiary. Elipsa się kurczy; pulsar i jego towarzysz powoli spadają na siebie. Oznacza to zmniejszanie się energii mechanicznej układu. Jeśli drugi składnik jest gwiazdą neutronową, to jedynym wytłumaczeniem jest ucieczka energii na zewnątrz, poza układ, w postaci fal grawitacyjnych. Fal tych, o których istnieniu Einstein był przekonany już w roku 1913, na dwa lata przed ostatecznym sformułowaniem ogólnej teorii względności, bez skutku poszukiwano w ciągu ostatnich



Rozwiązanie zadania F80
 Ze względu na symetrię, sposób podłączenia układu do źródła nie gra roli. Rozważmy kolejno $N = 2, 3, 4$.



Z symetrii układu wynika, że potencjały punktów 3 i 4 są równe. Opornik łączący te punkty można więc usunąć nie zmieniając prądów w pozostałych elementach obwodu. Podobna sytuacja ma miejsce przy $N > 4$. Potencjały punktów 3, 4, ..., N są równe i prądy płyną jedynie przez oporniki podłączone bezpośrednio do biegunów źródła. Układ jest więc równoważny następującemu obwodowi



Opór zastępczy takiego połączenia równoległego wynosi

$$\frac{1}{R_N} = \frac{1}{R} + (N-2) \frac{1}{2R} = \frac{N}{2R}$$

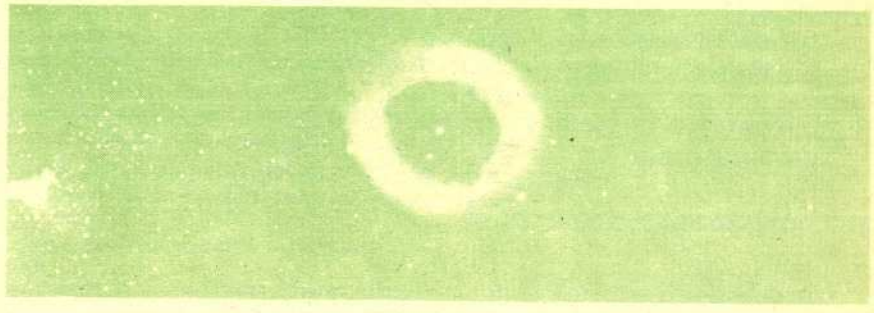
czyli

$$R_N = \frac{2R}{N}$$

dwudziestu lat. Ilość energii „zgubionej” przez nasz układ podwójny zgadza się nieźle z tym, czego w teorii Einsteina oczekuje się dla takiej pary gwiazd i takiej orbity. Inne, konkurencyjne teorie grawitacji, które przewidują w tym wypadku znacznie szybszą ucieczkę energii, zostałyby więc praktycznie obalone, a ogólna teoria względności, najprostsza ze wszystkich teorii grawitacji uważanych do tej pory za zgodne z doświadczeniem, okazałaby się najlepsza.

Tu trzeba dodać, że nie wszyscy relatywiści zgadzają się co do tego, ile dokładnie energii powinno wyciec z takiego układu podwójnego. Rozbieżności te wynikają z różnych przybliżeń czynionych przez nich w trakcie rachunków. Przybliżenia zaś są nieuniknione, bez nich problemu nie da się w ogóle rozwiązać. Gdyby piętnaście lat temu, kiedy nie wiadano jeszcze o istnieniu pulsarów, a gwiazdy neutronowe „istniały tylko na papierze”, ktokolwiek powiedział relatywistom, że dokładność ich rachunków można będzie jeszcze za ich życia sprawdzać w laboratorium... po prostu nie uwierzyliby!

To zaś, czy układ podwójny z PSR 1913+16 jest tym wymarzonym laboratorium, wyjaśni się w ciągu kilku najbliższych lat.



Patrz w niebo

Letnie gwiazdozbiory coraz wcześniej zachodzą, a wysoko na niebie górują konstelacje jesienne — charakterystyczny prostokąt Pegaza i na południe od niego Wodnik (*Aquarius, Aqr*). Jest to najlepszy okres do obserwacji dwóch najpiękniejszych mgławic planetarnych na naszym niebie — wielkiej mgławicy planetarnej (NGC 7293) w gwiazdozbiornie Wodnika nazywanej często Mglawicą Helikalną i mgławicy planetarnej w Lutni (M 57) nazywanej Mglawicą Pierścieniową. Mglawice te uzyskały nazwę „planetarne”, ponieważ ich wygląd czasami bardzo przypomina tarcze dużych planet. Pierwszym obserwatorom nieba używającym lunet często wydawało się, że odkryli planetę, jednak stwierdziwszy, że obiekty te są „nieruchome” i „gazowe”, nadali im nazwę mgławic planetarnych.

Mglawica w Wodniku jest uważana za największy i najbliższy obiekt tego typu. Ma rozmiary $12' \times 16'$, czyli zajmuje prawie pół szerokości Księżyca. Pomimo dużych rozmiarów jest ona słaba i ma niewielką jasność powierzchniową. Nie widać jej gołym okiem, jednak już przez lornetkę widoczna jest jako duża mglista plama słabo wyróżniająca się na tle nieba. Druga ze wspomnianych mgławic, M 57, jest niestety widoczna tylko przez większe teleskopy. Wszystkie znane nam podobne obiekty (a jest ich w naszych katalogach ponad 700) są to mniej więcej kuliste otoczki z bardzo rzadkiego gazu, w których centrum znajduje się bardzo gorący, niebieski zdegenerowany karzeł o temperaturze powierzchni często przewyższającej 100000 K. Jest on genetycznie związany z mgławicą, co widać po zbadaniu prędkości gazu. Okazuje się, że wszystkie mgławice są ekspandującymi otoczkami gwiazd centralnych. Prędkości rozchodzenia się wynoszą 10—50 km/s, średnice od $\frac{1}{20}$ do 1 pc, z czego można wyznaczyć średni wiek mgławicy — 10—20 tysięcy lat. Masa całej wyrzuconej otoczki rozrzucona jest z niewielką dyspersją wokół średniej wartości $0,1 M_{\odot}$.

Mechanizm powstawania mgławic planetarnych nie został poznany do końca, ale w ogólnym zarysie wyobrażamy go sobie następująco. Gwiazda o masie $1-4 M_{\odot}$, która w trakcie ewolucji wypaliła w jądrze hel, staje się bardzo rozdętym olbrzymem, w którego środku znajduje się skurczone jądro węglowe, a wokół niego w cienkich warstwach pali się hel i wodór. Otoczka takiego czerwonego olbrzyma jest tak rozdęta, że w wyniku pewnych niestabilności może odplynieć w przestrzeń, a jądro zupełnie tego nie odczuje, stając się po milionach lat stygnącym białym karłem. Lecz zanim to nastąpi, przez tysiąclecia oświetlać będzie ono odplývającą otoczkę, tworząc piękny efekt mgławicy planetarnej.

mgr Tomasz CHLEBOWSKI