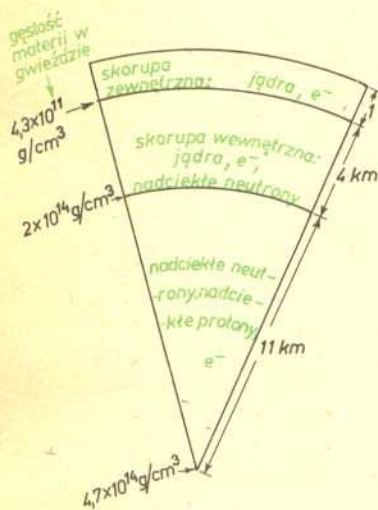


Rys. 6 Schematyczny wykres zmian prędkości obrotów pulsara; $\Delta\omega/\omega \sim 10^{-6}$ dla pulsara Vela i $\sim 10^{-8}$ dla pulsara Krab.



Rys. 7 Model gwiazdy neutronowej o masie 1,4 masy Słońca

następuje powolny zanik tych zaburzeń (rys. 6). Teoretyczne badania modelu pulsarów dalekie są od zakończenia — zależą bowiem istotnie od stanu teorii oddziaływań cząstek elementarnych. Model gwiazdy, który najlepiej „mieści się” w granicach danych z obserwacji astronomicznych, pokazany jest na rys. 7. Zewnętrzna skorupa gwiazdy składa się z jąder, od ^{56}Fe do ^{118}Kr , upakowanych w sieć periodyczną (jak w kryształach) i swobodnych elektronów. We wnętrzu gwiazdy znajduje się nadciecz neutronowa i protonowa. Neutrony i protony są fermionami. Okazuje się, że w pewnym zakresie gęstości tych cząstek występuje między nimi oddziaływanie przyciągające i mogą powstawać pary neutron-neutron i proton-proton. Pary takie, tak jak pary elektronów w nadprzewodniku (pary Coopera) są bozonami. Temperatura gwiazdy wynosi 10^8 K , a energia wiązania par ma wartość równoważną temperaturze 10^{11} K . Oznacza to, że materia neutronowa znajduje się w temperaturze na tyle niskiej, że zachodzi w niej kondensacja Bosego-Einsteina, podobnie jak w nadciekłym helu. Ponieważ gwiazda obraca się, w nadcieczy neutronów istnieją wiry, które przylepiają się do jąder z zewnętrznej skorupy. Prędkość obrotowa gwiazdy wciąż maleje, a więc jak w przypadku naczynia z nadciekłym helum powinniśmy oczekiwać okresowego odrywania się wirów i przyspieszania obrotów gwiazdy. Taki mechanizm powstawania skoków w prędkości obrotów zaproponowali dwa lata temu Alpar, Anderson, Pines i Shaham. Starszy model, tzw. model trzęsienia gwiazdy, opracowany w roku 1969 przez Rudermana, wyjaśniał istnienie nieregularności obrotów okresowym kurczeniem się skorupy gwiazdy. Gdy gwiazda zwalnia swoje obroty, w skorupie mogą powstawać naprężenia. Powodują one okresową zmianę rozmiarów gwiazdy. Jeśli gwiazda zmieni swoje rozmiary, to zmieni się również jej moment bezwładności, co musi prowadzić do zmiany prędkości obrotów.

Obecnie wydaje się, że obydwa mechanizmy chwilowego przyspieszania obrotów gwiazdy są możliwe. Nie należy zapominać także o tym, że gwiazda jest obiektem znacznie bardziej skomplikowanym niż naczynie z helum. Gwiazda jest kulista, więc wiry mają różną gęstość w różnych jej obszarach. Występuje oddziaływanie pomiędzy nadcieczą protonów i neutronów (protony i elektrony jako cząstki naładowane muszą obracać się razem z polem magnetycznym gwiazdy, podczas gdy neutrony stanowią stosunkowo swobodną ciecz). Ponadto nadciecz neutronowa ma, zależnie od gęstości, dwie fazy o różnym wypadkowym spinie pary neutronów. Te i szereg innych różnic powodują, że obserwuje się bardzo wiele innych nieregularności obrotów spowodowanych, być może, np. istnieniem warstw turbulentnych w cieczy neutronów bądź też wzbudzeniami fal, np. fal Tkaczki. Jednak doświadczenie z nadciekłym helum pomoże z pewnością odpowiedzieć na pytanie, czy mechanizm odrywania się wirów jest główną przyczyną skoków w prędkości obrotów gwiazd neutronowych.

Patrz w niebo

Czytając artykuły zamieszczone w tym numerze *Delty* zauważamy, że pojęcie niskiej temperatury jest względne. Fizycy konstruują aparaty do wytwarzania temperatur rzędu $0,001 \text{ K}$ i uważają substancje w nich oziębione za naprawdę zimne. Astrofizycy badający obłoki międzygwiazdowe zwykli nazywać obiekty o temperaturach ok. 10 tysięcy K ciepłymi, „zimne” oznacza dla nich 2—3 tysiące K . Astrofizycy zajmujący się gwiazdami neutronowymi uważają temperatury rzędu 10 milionów K za charakterystyczne dla obiektów „zimnych”.

Czy w Naturze obserwujemy rzeczywiście bardzo niskie temperatury, powiedzmy $T < 1 \text{ K}$, skoro wiadomo, że wszystkie obiekty zanurzone są w gazie fotonowym (tzw. promieniowanie reliktoowe pochodzące z bardzo wczesnych etapów ewolucji Wszechświata) o temperaturze $2,7 \text{ K}$?

Nie obserwujemy takich obiektów, jednak przewidujemy ich istnienie! Są to czarne dziury, grobowce wszelkich form materii, ale za to źródła wielu niespodzianek.

Astrofizycy relatywiści stworzyli dział nauki zwany termodynamiką czarnych dziur. Zgodnie z jej klasycznymi wynikami każda czarna dziura ma temperaturę 0 K (bo żaden foton nie może opuścić jej powierzchni). Obiekty te różnią się jedynie masą, momentem pędu i ewentualnie ładunkiem elektrycznym (który jednak szybko się „neutralizuje”).

Uwzględnienie efektów kwantowych, a w szczególności tzw. wirtualnych rozpadów cząstek w pobliżu horyzontu zdarzeń („powierzchni”) czarnych dziur, pozwala na stwierdzenie, że różnią się one również temperaturami. Część produktów rozpadu jest pożerana przez czarną dziurę, jednak pozostała część ucieka i oddziałując ze sobą emituje fotony, które mają taki rozkład, jakby były wytwarzane przez ciało doskonale czarne (takie ciało, które promieniuje zgodnie z rozkładem Plancka) o bardzo

$$\text{niskich temperaturach } (T): T = \frac{hc^3}{16\pi^2 GMk}$$

gdzie h — stała Plancka, c — prędkość światła, G — stała grawitacji, M — masa czarnej dziury, k — stała Boltzmanna.

Łatwo podstawić wartości liczbowe stałych i uzyskać zależność $T \approx 4,13 \cdot 10^{25} \text{ K/M}$ (masa w gramach). Jeśli teraz podstawimy masę Słońca, uzyskamy $T = 2 \cdot 10^{-8} \text{ K}$, temperaturę 2 tysiące razy mniejszą od najniższych temperatur uzyskiwanych sztucznie na Ziemi!

Czarne dziury mają masy rzędu kilku mas Słońca, możliwe że istnieją też dziury o masach miliardów mas Słońca, ale również o masach miliardy miliardów mniejszych niż masa Słońca (mini czarne dziury lub czarne dziury Hawkinga, który pierwszy przedstawił hipotezę o ich istnieniu; ten sam astronom również pierwszy poddał myśl o temperaturze jako parametrze odróżniającym czarne dziury).

dr Tomasz CHLEBOWSKI