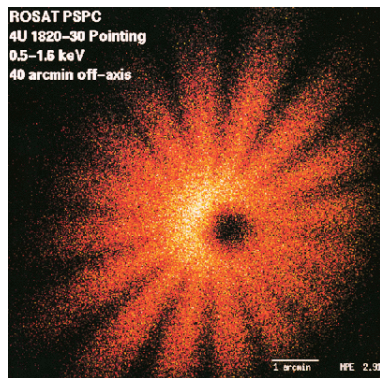


# Berstery rentgenowskie dziesięć lat później

\* Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Redaktorka *Delfy* w latach 2009–2012.

Berster rentgenowski (ang. *X-ray burster*) to specjalny układ podwójny gwiazd. Jeden składnik układu stanowi np. gwiazda podobna do naszego Słońca, zwana towarzyszem, a drugim jest gwiazda neutronowa (bardzo mała, ale niezwykle gęsta gwiazda będąca pozostałością po wybuchu supernowej). W takich układach materia przepływa z towarzysza na gwiazdę neutronową, ulegając na powierzchni ściśnięciu i ogrzaniu. Po osiągnięciu przez temperaturę i ciśnienie wartości krytycznych następuje zapoczątkowanie reakcji termojądrowych obserwowanych jako wybuch (stąd nazwa – *berster* – od angielskiego określenia *burst* – wybuch). Zjawisko to można obserwować w promieniowaniu rentgenowskim, skąd też drugi człon nazwy.



Ultra ciasny układ rentgenowski 4U 1820-30 znajdujący się w gromadzie kulistej gwiazd NGC 6624. Źródło: Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE)

Karłami nazywamy gwiazdy o stosunkowo małej masie i jasności (niektórych może zaskoczyć informacja, że Słońce jest karłem). Z czasem definicja rozciągnięta została na obiekty, które gwiazdami nie są. Na przykład białe karły to obiekty, które powstają po ustaniu reakcji termojądrowych i odrzuceniu otoczki wodorowej przez gwiazdy o małych i średnich masach.

Agnieszka MAJCZYNA\*

Od czasu odkrycia *bersterów rentgenowskich* minęło niemal 47 lat. W tym czasie dokonano ogromnego postępu w rozumieniu natury tych obiektów. Dowiedzieliśmy się, jak bardzo są ciekawe i zróżnicowane. Na przykład w ciągu ostatnich lat odkryliśmy berstery o ekstremalnie krótkich okresach orbitalnych. Ich liczba była tak duża, że powstała oddzielna grupa: ultra ciasnych układów rentgenowskich. Ugruntowaliśmy naszą wiedzę o składzie chemicznym atmosfer gwiazd neutronowych należących do układu bersterów i rozważaliśmy możliwość używania bersterów rentgenowskich jako świec standardowych. Ponadto niedawna detekcja fal grawitacyjnych ożywiła zainteresowanie właściwościami supergęstej materii znajdującej się we wnętrzu gwiazd neutronowych będących częścią bersterów.

## Czym są berstery?

Berstery rentgenowskie są układami podwójnymi złożonymi z gwiazdy neutronowej i towarzysza o masie mniejszej niż masa Słońca. Należą zatem do klasy obiektów zwanych mało masywnymi układami rentgenowskimi (LMXB od ang. Low Mass X-ray Binary). Obecnie znamy około 200 takich układów (w 2009 było ich 125), z których 80 to berstery rentgenowskie (wobec 40, o których pisałam w  $\Delta_{09}^{12}$ ). W układach tych materia przepływająca z towarzysza na gwiazdę neutronową nie splywa bezpośrednio, lecz opada po spirali, tworząc dysk akrecyjny. Następnie gromadzi się na powierzchni gwiazdy neutronowej, ulegając ściśnięciu i ogrzaniu. W momencie, gdy temperatura i ciśnienie gazu osiągną wartość krytyczną, rozpoczynają się reakcje syntezy termojądrowej powodujące znaczne i gwałtowane pojaśnienie nazywane wybuchem. Ważną i użyteczną cechą takich wybuchów (zwanych wybuchami typu I) jest fakt, że w trakcie gaśnięcia takiego wybuchu gwiazda neutronowa emituje promieniowanie w sposób charakterystyczny dla stygnącego obiektu zwartego. Obecność tego rodzaju wybuchów bezspornie wskazuje, że obiektem zwartym, na który opada materia, jest gwiazda neutronowa, a nie czarna dziura. Pozwala nam to na jednoznaczną ocenę, z jakim obiektem mamy do czynienia.

Berstery rentgenowskie jako układy podwójne mają okresy orbitalne krótsze niż 16 godzin. Rekordzistą w tej dziedzinie jest 4U 1820-30 z okresem orbitalnym równym tylko 11 minut! Z czasem, gdy odkrywano coraz więcej układów o bardzo krótkich okresach orbitalnych, stworzono oddzielną grupę obiektów nazwanych ultra ciasnymi układami rentgenowskimi (UCXB od ang. Ultra Compact X-ray Binaries). Zaliczają się do nich układy o okresach orbitalnych krótszych niż 80 min. Obecnie znamy 19 takich układów (mamy też około 30 niepotwierdzonych kandydatów na tego rodzaju obiekty). Tak krótki okres orbitalny oznacza, że składniki układu krążą bardzo blisko siebie. W konsekwencji towarzyszem gwiazdy neutronowej może być jedynie mała gwiazda typu karzeł lub biały karzeł, a dysk akrecyjny jest również bardzo mały. Obiekty te mają bardzo niską jasność zarówno w zakresie rentgenowskim, jak i w pozostałych zakresach widma promieniowania elektromagnetycznego. Większość UCXB może być obserwowana tylko przez instrumenty satelitów rentgenowskich. Dodatkowo pewna grupa UCXB należy do klasy tzw. źródeł przejściowych, czyli takich, gdzie epizody akrecji widoczne w promieniowaniu rentgenowskim rozdzielone są okresami, gdy ustaje akrecja, a jasność obiektu spada poniżej progu detekcji. Mimo to jesteśmy w stanie powiedzieć, jaki jest skład chemiczny akreowanego gazu. Ze względu na to, że w obiektach UCXB towarzyszem jest karzeł lub biały karzeł, gwiazda neutronowa akreuje materię ubogą w wodór. Widmo w zakresie od optycznego poprzez ultrafiolet po zakres rentgenowski zdominowane jest przez linie emisyjne pochodzące od helu, węgla, tlenu, neonu, brak jest natomiast charakterystycznych dla gwiazd ciągu głównego linii absorpcyjnych.

Więcej informacji na temat projektu Araukaria można znaleźć na stronie [araucaria.camk.edu.pl/](http://araucaria.camk.edu.pl/)

Świece standardowe to obiekty astronomiczne o znanej absolutnej jasności gwiazdowej. Ponieważ ich jasność jest niezmienna, możliwe jest oszacowanie odległości do takiego obiektu. A ogólniej – do galaktyki, w której się znajduje.

Jasność Eddingtona jest to maksymalna jasność, jaką może mieć gwiazda, której atmosfera nie ekspanduje ani się nie zapada.

## Berstery jako świece standardowe

Wyznaczanie odległości do obiektów astronomicznych jest skomplikowanym zadaniem, któremu poświęcono całe długoletnie projekty badawcze (np. w ramach projektu Araukaria). W przypadku bersterów rentgenowskich znajomość odległości jest krytycznie ważna, gdy chcemy weryfikować modele opisujące właściwości materii, z której zbudowana jest gwiazda neutronowa. Jeśli taki układ znajduje się w gromadzie kulistej, wówczas wyznaczamy odległość do gromady na podstawie dobrze znanych i dających precyzyjne wyniki metod. Jednak bersterów w gromadach kulistych jest niewiele (16 obiektów w 13 gromadach kulistych), dlatego poszukuje się takich cech fizycznych bersterów rentgenowskich, które pozwolą na opracowanie bezpośredniej, niezależnej od otoczenia układu, metody wyznaczania do nich odległości. Mówiąc dokładnie, chcieliśmy ustalić, czy berstery rentgenowskie mogą być świecami standardowymi. Pomocne okazały się wybuchy, od których przecież berstery wzięły swoją nazwę. Okazuje się, że jasność tych wybuchów jest bardzo bliska bądź równa jasności Eddingtona. Zatem jeśli jesteśmy w stanie zmierzyć strumień promieniowania w maksimum wybuchu  $f_{ob}$  i z modeli teoretycznych znamy jasność Eddingtona  $L_{Edd}$  dla gwiazdy neutronowej, to wówczas odległość możemy wyliczyć z wyrażenia:  $d = \sqrt{L_{Edd}/(4\pi f_{ob})}$ . Wyrażenie to jest w swej matematycznej postaci bardzo proste, jednak sama metoda taką nie jest. Wartość jasności Eddingtona zależy od nieprzezroczystości gazu, czyli od tego, w jakim stopniu pochłaniane są w nim fotony. Im nieprzezroczystość jest większa (fotony są bardziej pochłaniane), tym jasność Eddingtona jest mniejsza. Nieprzezroczystość zaś zależy między innymi od składu chemicznego gazu i jego temperatury. Obie te wielkości są słabo poznane w przypadku bersterów rentgenowskich. Obecnie wiemy, że jasność obserwowana bersterów rentgenowskich w maksimum wybuchów z ekspansją fotosfery (na granicy jasności Eddingtona) jest taka sama z dokładnością do kilku procent. Zatem można uznać, że obiekty w trakcie takich wybuchów mogą być używane jako świece standardowe.

## Gwiazdy neutronowe w bersterach

Berstery rentgenowskie są w centrum uwagi astronomów nie tylko ze względu na fascynujące procesy zachodzące w układach podwójnych gwiazd, ale także ze względu na same gwiazdy neutronowe, które są ich częścią. Pomimo że od odkrycia gwiazd neutronowych minęło już ponad 50 lat, to zagadką pozostają właściwości materii, która je tworzy (stąd też tak istotne jest znalezienie metody wyznaczenia odległości do takiego układu). Dla gwiazdy neutronowej o promieniu rzędu 10 km i masie 1,4 masy Słońca gęstość materii w jądrze przewyższa kilkakrotnie gęstość jądra atomowego ( $\rho_0 \approx 2 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>). Materii o takich własnościach nie jesteśmy w stanie otrzymać w żadnym z ziemskich laboratoriów. Jedynym zatem sposobem na poznanie jej właściwości jest stworzenie modeli teoretycznych i porównanie ich z obserwacjami astronomicznymi. Model ten może mieć np. postać zależności masy gwiazdy od jej promienia, dlatego ważnym zagadnieniem jest opracowanie metod wyznaczania zarówno odległości od układu, jak i mas obiektów i ich promieni. Dokładne wyniki oszacowań tych wielkości na podstawie obserwacji pozwolą na potwierdzenie bądź odrzucenie modeli teoretycznych.

Wybuchy na powierzchni gwiazd neutronowych będących częścią bersterów powodują, że gwiazdy te są gorące, a więc łatwo obserwowalne w zakresie rentgenowskim. Ponadto wybuchy z ekspansją fotosfery gwiazdy dają wyjątkową możliwość wyznaczenia promienia gwiazdy neutronowej. Podczas takiego wybuchu atmosfera gwiazdy (wzbogacona o gaz pochodzący z akrecji) pod wpływem ciśnienia promieniowania zwiększa swój promień do wartości maksymalnej, po czym atmosfera opada na powierzchnię gwiazdy. Właśnie ten moment wybierany jest aktualnie do wyznaczenia promienia gwiazdy neutronowej. Przez długi czas uważano, że w trakcie szczególnie silnych wybuchów wpływ akrecji na atmosferę można zaniedbać, gdyż przepływ materii jest bardzo mały. Dopiero w 2012 roku okazało się, że, istotnie, w trakcie



Delta, kwiecień 2008



Delta, kwiecień 2009



wybuchów przepływ materii jest bardzo mały, ale nie można go zaniedbać, gdyż prowadzi to do niewłaściwych oszacowań parametrów gwiazdy. W szczególności w bersterach rentgenowskich tempo przepływu materii z towarzysza na gwiazdę neutronową nie jest stałe, lecz zmienia się w zamkniętym cyklu, którego długość jest inna dla każdego obiektu. Zatem do wyznaczania masy i promienia gwiazdy neutronowej należy wybierać obserwacje, gdy tempo akrecji jest najmniejsze, by zminimalizować potencjalny wpływ tego zjawiska na pomiary.

### Kolejne niespodzianki

Berstery rentgenowskie i rezydujące w nich gwiazdy neutronowe pomimo ogromnego postępu w rozumieniu ich natury wciąż skrywają tajemnice i są interesujące zarówno dla astronomów jak i fizyków. Detekcja fal grawitacyjnych ożywiła zainteresowanie tymi niezwykłymi obiektami i potrzebę lepszego poznania własności materii, z jakiej zbudowane jest wnętrze gwiazdy neutronowej. Ukonstytuowanie nowej podklasy obiektów, czyli ultra ciasnych układów rentgenowskich, pokazało, że na astronomów zajmujących się układami rentgenowskimi wciąż czekają niespodzianki. Liczne prace (w tym autorki tego artykułu) wskazują także na potrzebę stworzenia i wysłania w przestrzeń kosmiczną satelitów, których instrumenty dostarczą obserwacji obciążonych mniejszymi niepewnościami pomiarowymi. Wierzmy, że przyniosą one zarówno odpowiedzi na już postawione pytania, jak i nowe, niespodziewane odkrycia.

## Liczba chromatyczna z komputera

Michał ADAMASZEK\*

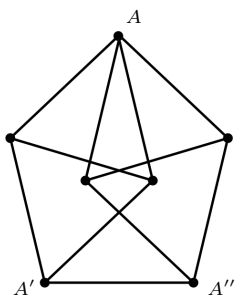
\* Kopenhaga

Redaktor *Delty* w latach 2006–2007.

W 1976 roku, na drugie urodziny *Delty*, Kenneth Appel i Wolfgang Haken ogłosili dowód twierdzenia o czterech barwach. W nieco nieformalnej wersji głosi ono, że każdą mapę polityczną, na której wszystkie kraje mają spójne terytorium, można pokolorować czterema lub mniej kolorami tak, aby osiągnąć znany nam z kartografii efekt, w którym każde dwa graniczące ze sobą kraje mają różne kolory. Wynik ten był przełomowy z dwóch powodów. Po pierwsze, rozwiązywał znaną w teorii grafów hipotezę o bardzo długiej i (nota bene) barwnej historii. Po drugie, był to pierwszy, a przez to kontrowersyjny, poważny wynik, w którego dowodzie użyto komputera (po sprowadzeniu problemu do pewnej skończonej, lecz dużej liczby przypadków do sprawdzenia). O tej historii można przeczytać w  $\Delta_{04}^6$ .

Wynik Appela i Hakkena można przeformułować na stwierdzenie, że dla dowolnego planarnego grafu  $G$  mamy  $\chi(G) \leq 4$ . Tutaj  $\chi(G)$  jest liczbą chromatyczną grafu  $G$ , czyli najmniejszą liczbą kolorów potrzebną do pokolorowania wierzchołków  $G$  tak, żeby żadne dwa wierzchołki połączone krawędzią grafu nie miały tego samego koloru. Problemy związane z kolorowaniem grafów i obliczaniem liczby chromatycznej są algorytmicznie trudne i, poza walorami estetycznymi, znajdują zastosowanie na przykład w problemach planowania i przydziału zadań. O tych zagadnieniach była już w *Delcie* nie raz mowa, patrz na przykład  $\Delta_{14}^{11}$ .

Pojęcie liczby chromatycznej grafu można też odnieść do innych zagadnień kolorowania. W  $\Delta_{08}^7$  pytałem, jak wykazać, że jeśli każdy punkt płaszczyzny  $\mathbb{R}^2$  pokolorujemy jednym z trzech kolorów, to znajdą się dwa punkty tego samego koloru odległe o dokładnie 1. Dowód znajduje się na rysunku, gdzie widzimy konfigurację 7 punktów z zaznaczonymi odcinkami długości 1, zwaną wrzeczkiem Mosera. Liczba chromatyczna tego grafu wynosi 4 (faktycznie: próba kolorowania 3 kolorami prowadzi do wniosku, że  $A$  i  $A'$  muszą mieć ten sam kolor; analogicznie  $A$  i  $A''$ ; a więc punkty  $A'$  i  $A''$  odległe o 1 mają ten sam kolor; sprzeczność). Jeżeli więc oznaczymy przez  $\chi(\mathbb{R}^2)$  najmniejszą liczbę kolorów potrzebną do uniknięcia pary punktów tego samego koloru



Wrzeczono Mosera: 7 wierzchołków, wszystkie krawędzie długości 1