

Pierwszy Rentgen Łabędzia

Mgr Włodzimierz KLUŻNIAK



Łabędź. Czarny, skarlały trup gwiazdy, która w prehistorii runęła pod własnym ciężarem, pożera swojego gigantycznego sąsiada. Lecz nie doszczętnie. W agonicznych błyskach przepadająca w czeluściach materia zawiadama o swym losie całą Galaktykę. W chwili, gdy strumień twardych fotonów ratując się przed zagładą wyruszył w kierunku Ziemi, otóż w tej właśnie chwili człowiek po raz pierwszy w historii doi zwierzę udomowione — jutro nada nazwę Drodze Mlecznej. Rozpoczął się neolit.

Pięć tysięcy lat później połowę podróży wskazują wycelowane w niebo ostrołupy piramid. Lecz Łabędzia na niebie dostrzegamy dopiero z grecko-rzymskiego wybrzeża Morza Śródziemnego po dalszych lat dwu i pół tysiącach i tyleż samo przed rozpoczęciem ostatnich przygotowań — a trwały one lat siedemdziesiąt.

W 1895 r. Roentgen stwierdza zaciernienie nie naświetlonej kliszy, Marconi buduje radio, Einstein wstępuje na ETH w Zürichu. Sześć lat później świat poznaje stałą Plancka, rodzi się Heisenberg. W 1939 r. J. Robert Oppenheimer dokonuje syntezy myśli Einsteina i Heisenberga — pokazuje, że gwiazdy neutronowe i czarne dziury mogą istnieć. Sześć lat później świat poznaje inny owoc syntezy Oppenheimera — ginie Hiroshima. Pozostało tylko czekać na dzieła Koroliewa i Wernera von Brauna.

W 1965 roku amerykańska rakietka badawcza odkrywa Pierwszy Rentgen Łabędzia. Sześć lat później z Kenii, kolebki ludzkości, startuje satelita Uhuru (Niepodległość). Stwierdza nagłe stwardnienie rentgenowskiego widma Łabędzia, jednocześnie do Ziemi dociera front fali radiowej pozwalający czasom radioteleskopów wskazać dokładne położenie źródła. Na mapach nieba naniesiono pozycję Cygnus X-1.

Czas już przedstawić rozumowanie Oppenheimera dotyczące śmierci i ostatnich dni życia gwiazd. Przedtem wszakże wyjaśnijmy, dlaczego Słońce — olbrzymia kula gorących gazów — nie zapada się pod własnym ciężarem. Dlatego, że w jego sercu zachodzi ciągły wybuch bomby wodorowej; wydziela się bezustannie energia. Ciśnienie promieniowania i ciśnienie kinetyczne gazu wywołane gradientem temperatur dosłownie rozsada od środka gwiazdę równoważąc siły grawitacji. Ale z czasem cały wodór we wnętrzu wypali się pozostawiając po sobie „popioły” helowe. Czy stygnąc Słońce zamieni się w dużego Jowisza, ciało stałe otoczone cieczą i gazami? W żadnym wypadku. Po pierwsze, gwiazda zapadając się w sobie (po ustaniu podtrzymujących ją reakcji termojądrowych) rozgrzewa się — wyzwala się ogromne zasoby potencjalnej energii grawitacyjnej; jednocześnie rośnie jej gęstość i potężnieją siły ciążenia.

$$\frac{F}{m} = \frac{GM(r)}{r^2}, \quad M(r) = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho.$$

F/m — siła ciążenia oddziałująca na jednostkę masy w punkcie kuli odległym o r od jej środka, $M(r)$ — masa zawarta w kuli o promieniu r , ρ — gęstość gwiazdy.

W końcu ciśnienie i temperatura wzrosną do wartości wystarczających do syntezy węgla z helu — gwiazda odżywa, proces zapadania jest powstrzymany dopóki nie wypali się hel. Lecz wreszcie całe zasoby energii termojądrowej wyczerpią się, wygaśnie ostatnia z możliwych reakcji, co wtedy? Dlaczego gwiazda nie może zamienić się w chłodną kulę węgla, magnezu czy żelaza? Przecież czujemy pod stopami ziemię — nie zapada się ona ani pod własnym, ani pod naszym ciężarem.

Otóż Ziemia składa się z ciasno, w gruncie rzeczy, upakowanych atomów. Rozmiary jej określone są liczbą tych atomów i ich wielkością. Wielkość zaś atomu jest właściwie wyznaczona przez zasadę nieoznaczoności Heisenberga: iloczyn fluktuacji pędu cząstki i fluktuacji jej położenia jest rzędu stałej Plancka, $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar \approx 10^{-34}$ dżul · sekunda. Istotnie, energia elektronu w atomie wodoru dana jest klasycznym wzorem

$$E = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{r},$$

p — pęd elektronu, r — jego odległość od jądra; stałe e i m to odpowiednio ładunek i masa elektronu. Czytelnik zechce się przekonać, że E przyjmuje minimalną wartość dla promienia „orbity” elektronu $r = a_0 = \hbar^2 / (m e^2) \approx 0,5 \times 10^{-10}$ m, przy założeniu że pęd i położenie elektronu związane są związkiem zgodnym z zasadą Heisenberga, tzn. $pr = \hbar$ (wszak promień atomu określa zakres możliwych fluktuacji położenia elektronu).

Widać od razu, że (niemała) praca wykonywana przy ściskaniu atomu idzie na zwiększenie energii kinetycznej elektronu. Ma to kapitalne konsekwencje. Wyobraźmy sobie, że byłoby możliwe takie schłodzenie jądra wygasłej gwiazdy, że zamieniałoby się ono w pęczniący kryształ np. węgla. Niestety nie otrzymamy tą drogą potężnej diamentowej kuli — już wkrótce atomy tego diamentu będą poddane tak wysokiemu ciśnieniu (masa Słońca $\approx 10^30$ mas Ziemi!), że zostaną zmiażdżone; elektrony zamykane w coraz cieńszym obszarze nabiorą tak wielkich

pedów, że uwolnią się od przyciągającego działania jąder — wystrzelą jak z procy. Kryształ atomowy roztopi się w ciecz swobodnych elektronów i jąder. Gwiazda będzie zapadać się dalej, niedługo wszakże napotyka ponownie przeszkodę Heisenberga. Gaz swobodnych elektronów wywiera, niezależnie od temperatury, nawet w zerze bezwzględny ciśnienie. Już w szkole średniej uczą nas, że ciśnienie gazu doskonałego jest proporcjonalne do n , liczby jego „atomów” w jednostce objętości, do średniej prędkości „atomów” v i ich średniego pędu p :

$$P = knvp, \text{ gdzie } k \text{ jest liczbą bliską jedności.}$$

W naszym przypadku „atomami” są elektrony. Dla niezbyt wielkich prędkości można stosować nierelatywistyczny wzór $p = m_e v$, skąd znany związek

$$P \approx n \cdot m_e v^2 = n \frac{p^2}{m_e} \approx n \cdot E_{kin}.$$

(Dla gazów rozrzedzonych średnia energia kinetyczna jest rzędu temperatury pomnożonej przez stałą Boltzmann, co przy uwzględnieniu równości $n = N/V$ daje oczywiście $P_{kin} V = NkT$; ciśnienie tu występujące nazywamy kinetycznym).

W jednostce objętości jest n elektronów, nieoznaczoność położenia elektronu jest zatem rzędu $n^{-1/3}$ i pęd $p \approx \hbar/r = \hbar n^{1/3}$. Przy niewielkich gęstościach p jest niewielkie, zatem

$$P \approx n \frac{p^2}{m_e} \approx \frac{\hbar^2}{m_e} n^{5/3} \sim \rho^{5/3}.$$

Przy wielkich gęstościach pędy są olbrzymie i elektrony poruszają się praktycznie z prędkością światła ($v = c$). Mamy od razu

$$P \approx ncp \approx \hbar c n^{4/3} \sim \rho^{4/3}.$$

Widzimy, że w obu wypadkach to tzw. ciśnienie degeneracji nie zależy od temperatury i rośnie ze wzrostem ρ szybciej od ciśnienia kinetycznego ($P_{kin} \sim \rho T$), a więc musi odgrywać przy znaczniejszych gęstościach rolę dominującą.

Dla pewnego zakresu mas gwiazdy ciśnienie degeneracji elektronów równoważy siły grawitacji — powstaje i istnieje biały karzeł, w każdym jego cm^3 mieści się 100 kg materii, Słońce mieści się w rozmiarach Ziemi. Im masywniejszy biały karzeł, tym mniejszy (większe ciśnienie — większa gęstość — mniejsza objętość).

Powyżej 1,4 mas Słońca (ta granica Chandrasekhara nie uwzględnia możliwości bardzo szybkich obrotów ani możliwości występowania bardzo silnych pól magnetycznych) karzeł nie może już znieść własnego ciężaru, zapada się „pod ziemię”. Elektrony, nie mogące istnieć w takim tłoku (zakaz Pauliego) łączą się z jądrami, te zaś łączą się ze sobą, powstaje gęsta zupa neutronowa. Tu po raz ostatni może interweniować Heisenberg, trzeba tylko zastąpić m_e w (1) blisko 2000 razy większą masą neutronu. Gigantyczna kropla zupy przestaje się zapadać w sobie, z wierzchu pokrywa się skorupą.

Gwiazdy neutronowe są małe (promień ~ 10 km), ich gęstość sięga 10^{14} g/cm³.

Obserwowane są jako tzw. pulsary, wirując błyskawicznie wokół swej osi, promieniowaniem wysyłanym z małego obszaru powierzchni omiatają kosmos niczym latarnia morska. Nie ma pewności, jak bardzo mogą być masywne. Górna granica ich masy musi być jednak mniejsza od 3 mas Słońca. I to jest klucz do czarnej dziury. Gwiazdy masywniejszej, o ile nie znajdzie ona sposobu na pozbycie się nadwagi (np. w eksplozji supernowej), nic nie powstrzyma, zapadnie się, skurczy, czernieje. To samo spotka gwiazdę, na której barki spadnie zbyt wielki ciężar przyciąganej przez jej pole grawitacyjne materii — zewnętrznych warstw poruszającej się po ciasnej orbicie sąsiadki, gwiazdy, z którą stanowi układ podwójny. Gdy masa krytyczna zostanie przekroczona, nie pomoże już nic, nawet pancierz 10^{17} razy sztywniejszy od stali — czyli krystaliczna skorupa gwiazdy neutronowej. Powstaje czarna dziura.

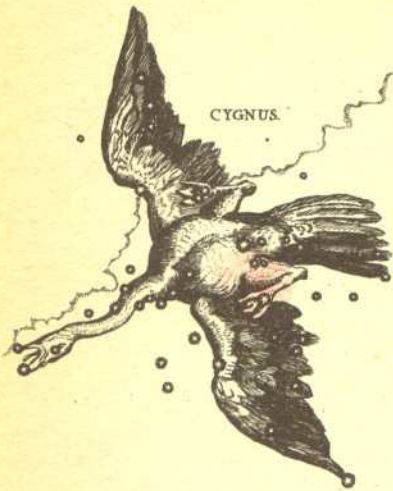
Przy okazji zastanówmy się, ile energii wyzwala się przy spadku materii na zwarty obiekt, jak to się dzieje w wielu układach podwójnych. Już w wypadku gwiazdy neutronowej GMm/r sięga 30% energii spoczynkowej (mc^2) spadającej masy m ($G \approx 7 \cdot 10^{-11}$ J m/kg², $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, $M_{\text{Słońca}} \approx 2 \cdot 10^{30}$ kg, $r_{\text{gw. neut.}} \approx 5 \cdot 10^3$ m). Jest to proces wielokrotnie wydajniejszy od dowolnej reakcji jądrowej! Nic dziwnego, że w takich warunkach ma miejsce potężna emisja promieniowania rentgenowskiego.

Czarna dziura jest całkiem nieduża, jej promień to $2,95 \frac{M_*}{M_{\odot}}$ km. Nie pamięta swej

przeszłości, zatraciła tożsamość; wszystkie jej własności są określone trzema liczbami: masą, ładunkiem elektrycznym i momentem pędu.

Wszystko, co zbliży się za bardzo do czarnej dziury, nieknie bezpowrotnie pod jej horyzontem, łącznie ze światłem. Jej samej nie widać nawet z bliska. Trzeba było całego doświadczenia astronomii, by dojrzeć ją z odległości 10 000 lat świetlnych. Oto przesłanki:

1) W znanych już okolicznościach określono położenie na sferze niebieskiej źródła rentgenowskiego Cygnus X-1. Pokrywa się ono z położeniem gwiazdy widocznej w nodze Łabędzia gołym okiem, zaksięgowanej niegdyś pod numerem HDE 226868. Jej widmo



Rozwiązanie zadania M 260. Dowolną prostą prostopadłą np. do p odbijamy symetrycznie względem q i względem r . W przecięciu obrazów znajduje się wierzchołek poszukiwanego trójkąta. Opisany przepis może jednak zawieść (kiedy?). Wówczas zmieniamy p na q i udam się na pewno.



wskazuje, że to nadolbrzym typu B, gorąca niebieska gwiazda; skoro tak, to jej obserwowana jasność wskazuje na oddalenie podane wyżej. Mogłaby to też być mała gwiazda niedawno odkrytego typu HZ 22 o podobnym widmie, wtedy leżałaby całkiem niedaleko, około 600 lat świetlnych stąd (fatalne dla hipotezy czarnej dziury). Ale nie jest, jej obserwowany kolor jest żółty, zatem jej światło musiało przejść przez znaczną ilość materii, rozpraszającej wszak błękit — efekt widziany codziennie na niebie. Badanie gwiazd leżących w tym samym kierunku co HDE 226868, których typ widmowy i odległość wyznaczono bezspornie, wykazało u nich mniejsze poczerwienienie, a więc są one bliżej nas. HDE 226868 musi być odleglejsza od najdalszej z nich — leżącej w odległości 4500 lat świetlnych — zatem faktycznie jest to nadolbrzym widziany z odległości 10 000 lat świetlnych!

2) Widmo tego nadolbrzyma wykazuje periodyczne przesunięcia Dopplera. Gwiazda ta, o masie 30 mas Słońca krąży wokół niewidocznego towarzysza. Z analizy ruchu wynika, że towarzysz ma masę $5 \div 6$ mas Słońca.

3) Materia nadolbrzyma spada na towarzysza — widać to po liniach emisyjnych wodoru i helu, których przesunięcie dopplerowskie jest inne niż widma samego nadolbrzyma.

4) Widmo rentgenowskie Cygnus X-1 wykazuje zmienność nawet w skali milisekund. Oznacza to, że obszar wysyłający promieniowanie X ma rozmiary najwyżej milisekundy świetlnej, $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 150 \text{ km}$.

5) Według obecnego stanu wiedzy nie ma tak zwartych i zarazem tak masywnych obiektów innych niż czarne dziury.

Trwają poszukiwania krewnych Łabędzia X-1. Jak dotąd — jest tylko paru niezbyt pewnych kandydatów.

Patrz w niebo

Znowu wysoko na niebie wznosi się wieczorami znany już chyba wszystkim Wolarz (który zawsze bardziej przypomina mi maczugę) z jasną gwiazdą Arkturem (która dla mnie oznacza rękojeść), o której pisaliśmy równo rok temu. Obok — diadem tworzący konstelację Korony Północnej (*Corona Borealis*).

W tym bardzo małym gwiazdozbiornie, mając dobry wzrok i odrobinę szczęścia (obiekt jest 6 wielkości gwiazdowej przeważnie) można dostrzec jedną z ciekawszych gwiazd naszego nieba. Najjaśniejsza zmienna gwiazda w danej konstelacji przeważnie nazywa się zwyczajowo *R*, tak więc i ta, o której przed chwilą wspomnieliśmy, odkryta przez Anglika E. Pigotta w 1795 r., została ochrzczone *R Coronae Borealis* (*R CrB*). (Ściśle mówiąc, literę *R* (a potem *S*, *T* itd.) otrzymały najczęściej odkryte gwiazdy zmienne w poszczególnych gwiazdozbiornach)

R CrB co parę lat nagle wielokrotnie słabnie — czasem 10-krotnie, a czasem 10 tysięcy razy.

W swoim minimum nie przebywa przeważnie dłużej niż kilka miesięcy, po czym powoli wraca do swojego normalnego stanu. Gwiazda ta jest często nazywana „zmienną idealnie nieregularną”, ponieważ momenty spadku jasności „nie trzymają się” żadnych zależności, oprócz jednej: długość okresu między dwoma spadkami jasności jest czysto przypadkowa.

Obecnie znamy około 70 gwiazd zachowujących się w podobny sposób oraz mających wiele innych, wspólnych i ciekawych cech. Jedną z takich cech jest fakt, że atmosfera *R CrB* i innych obiektów tej klasy składa się w blisko 70% z węgla (!). Skład chemiczny atmosfery naprowadził w latach trzydziestych włoskiego astronoma E. Loretę na pomysł, który pozwolił mu zbudować „model” *R CrB*, który to model w najgrubszym zarysie utrzymał się do dzisiaj.

Otóż węgiel będący w atmosferze gwiazdy jest powoli wyrzucany w przestrzeń dzięki mechanizmowi tzw. wiatru gwiazdowego (znanego nam m.in. ze Słońca). Temperatura oddalającego się od gwiazdy węgla maleje, co pozwala mu w pewnej odległości krystalizować. Powstaje otoczka pyłu grafitowego, która powoli grubieje. Utrzymuje się ona mniej więcej w stałej odległości od gwiazdy dzięki równowadze siły przyciągania grawitacyjnego i ciśnienia wywieranego przez fotony wyświecane przez gwiazdę. W pewnym momencie wewnętrzna część otoczki jest już tak gruba, że nie przepuszcza dostatecznie dużej ilości fotonów potrzebnych do podtrzymania części bardziej odległej. I nagle równowaga sił załamuje się i cały grafit spada na „powierzchnię” gwiazdy, stając się jeszcze bardziej gęstym, nieprzezroczystym i powodując silny spadek jej jasności. Wnętrze atmosfery, nie chłodzone przez opuszczające ją fotony rozgrzewa się, opadły pył zamienia się w gaz, następuje powoli wzrost ciśnienia promieniowania na atomy, między innymi węgla i cały proces zaczyna się od początku.

Model ten w ciągu kilkudziesięciu lat ulegał wielu poważnym i szczegółowym modyfikacjom, jednak jego trzon pozostaje do dzisiaj „linią pertyjną” wyjaśniania zmienności gwiazd typu *R Coronae Borealis*.

mgr Tomasz CHLEBOWSKI