

Rys. 1

W gwiazdach za transport energii odpowiedzialne są:
 — promieniowanie przenoszące energię promienistą między warstwami,
 — konwekcja będąca procesem przenoszenia ciepła razem z materią.

Wstęp

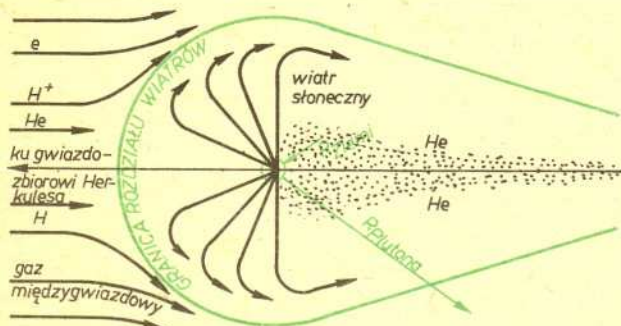
Gwiazdy to kule zbudowane z plazmy bądź materii jądrowej, wyzwalające energię promienistą z zasobów swej energii wewnętrznej. Energia wewnętrzna może być wyzwalana na skutek: reakcji termojądrowej, kurczenia grawitacyjnego, przemian fazowych, eksplozji lub implozji. Taka definicja włącza do klasy gwiazd szereg obiektów o drastycznie różnych własnościach astrofizycznych. Charakterystyki czysto zewnętrzne mówią, że zakres temperatur powierzchniowych będzie od około 2 do 100 tys. K, zaś jasność od dziesięciotysięcznej do miliona jasności Słońca (L_{\odot}). Równie wielkie różnice występują w promieniach: od gwiazdy neutronowej, której jedną półkulę można by skryć w Rowie Filipińskim (druga udawałaby Mt. Everest wystając z morza), poprzez białe karły o rozmiarach naszej Ziemi, do najrozleglejszych czerwonych olbrzymów z fotosferą kończącą się w okolicy Saturna. Są dwie przyczyny takiego zróżnicowania wśród gwiazd: masa (od 0,01- do 100 mas Słońca (M_{\odot})) oraz stan zaawansowania ewolucyjnego.

Opadająca materia to plazma, czyli zjonizowany gaz o odpowiednio dużej koncentracji cząstek naładowanych, zawierający jednakowe ilości ładunków dodatnich i ujemnych, bądź materia międzygwiazdowa rozumiana jako mieszanina plazmy i ziaren pyłu. W przeważającej jednak liczbie wypadków to „coś”, co osiada na gwiazdzie, pochodzi od towarzysza wspólnej doły, bo gwiazdy tak jak ludzie często występują parami. W astrofizyce opadanie materii określa się terminem akrecji. Powyżej wspomniałem o zaawansowaniu ewolucyjnym. Uszeregujmy obiekty gwiazdowe w ten sposób. Na początku cyklu rozwojowego będzie gwiazda ciągu głównego. Po wypaleniu wodoru w jądrze gwiazda rozszerza się rozbudowując rozległą otoczkę konwektywną (czerwony olbrzym), aby następnie w zależności od masy początkowej stać się białym karłem lub gwiazdą neutronową.

Opadanie materii na gwiazdy pojedyncze

Poszukajmy najpierw śladów akrecji lub procesów podobnych w najbliższej okolicy Ziemi. Pierwszą gwiazdą, którą napotykamy, jest nasze Słońce — typowy małowasywny przedstawiciel gwiazd ciągu głównego. Czy i jak zachodzi tu interesujące nas zjawisko? Słońce przemieszcza się w rzadkim obłoku materii międzygwiazdowej z prędkością 20 km/s w kierunku gwiazdozbioru Herkulesa. Poszczególne jony, elektrony, atomy neutralne gazu międzygwiazdowego powinny więc w jakiś sposób oddziaływać wzajemnie ze Słońcem. Wiemy, że na skutek swej aktywności najbliższą nam gwiazda emituje wiatr o dość znacznej prędkości, która w okolicy Ziemi osiąga wartość 400 km/s. W rozważanym przypadku „opadanie” gazu międzygwiazdowego (opadanie to jest względne, bo faktycznie to Słońce przechodzi przez gaz) polega na wzajemnym oddziaływaniu z wiatrem słonecznym.

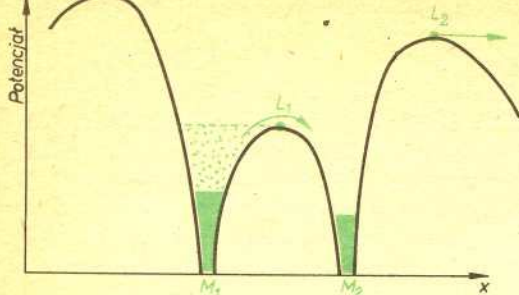
Drugim przykładem akrecji na gwiazdy pojedyncze może być sytuacja istniejąca podczas kontrakcji protogwiazd w optycznie grubym ośrodku otulającym. Jak wykazały obliczenia modelowe, centrum takiego obłoku ewoluuje szybciej niż obszary zewnętrzne, tworząc zagęszczenie. Zgęstka ten otoczony jest sferycznie symetryczną falą uderzeniową powstającą na skutek opadania materii obłoku. Tam też wydzielane są znaczne ilości energii, która reemitowana jest następnie w podczerwonym zakresie widma. Możliwe jest jednak istnienie i takich obiektów, których nie da się zaobserwować na tym etapie ewolucyjnym, gdyż cała energia jest absorbowana wewnątrz.



Rys. 2

Kontrakcja to proces swobodnego grawitacyjnego zapadania się materii przebiegający np. w obłokach materii międzygwiazdowej czy gwiazdach. Mówimy, że ośrodek jest optycznie gruby, gdy niemożliwe jest bezpośrednie wypromieniowanie ciepła na zewnątrz obiektu astronomicznego. Proces wypromieniowywania odbywa się w tym przypadku przez szereg aktów absorpcji i emisji.

Gwiazdy podwójne a akrecja



Rys. 3. Schematyczny przebieg potencjału grawitacyjnego w otoczeniu dwóch mas M_1 i M_2 .

W gwiazdach podwójnych możliwość realizacji akrecji jest o wiele szersza i zależy od wielu czynników. Wiemy, że dwie związane ze sobą masy oddziałują grawitacyjnie jedna na drugą. Linie stałego potencjału dla takiego układu tworzą pewną strukturę: z powierzchnią Roche'a i punktami Lagrange'a L_1 i L_2 , w których siły znoszą się (przez punkty te może nastąpić błąd przepływu (L_1), bądź wypływu (L_2) materii).

Nas interesuje przepływ przez L_1 i to, jak może realizować się opadanie materii na składnik drugi. Pierwszy wypełniwszy swoją powierzchnię Roche'a inicjuje przepływ i akrecja może nastąpić jako:

- dyskowa, gdy materia obdarzona jest dostatecznie dużym momentem pędu (J),
- sferycznie symetryczna, gdy J jest małe,
- kolumnowa, gdy obiekt, na który zachodzi akrecja, ma silne pole magnetyczne,
- wiatrowa, gdy wiatr gwiazdowy z pierwszego składnika oddziałuje na drugą gwiazdę.

Teraz szerzej omówię tylko ostatnie trzy zjawiska, pomijając akrecję dyskową, której opis można znaleźć w szeregu opracowań popularno-naukowych.

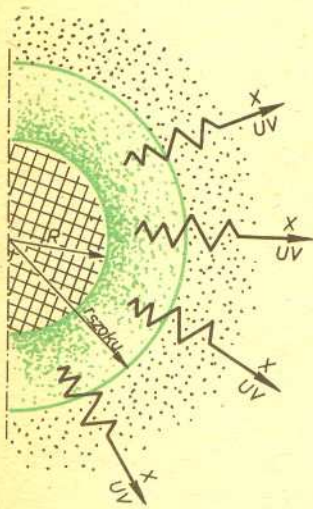
Akrecja sferycznie symetryczna

Podczas spadania materii w polu grawitacyjnym gwiazd pewne wielkości: prędkość, gęstość i temperatura zmieniają się w sposób skokowy, inne zaś, jak strumień materii, energii i pędu pozostają ciągłe. Skokowa zmiana powyższych parametrów następuje wzdłuż pewnej powierzchni i prowadzi do powstania fali uderzeniowej. Usytuowanie tego sferycznie symetrycznego szoku (fali) zależy od promienia gwiazdy (R) i tempa opadania materii ($\dot{M} = dM/dt$). W szoku i w warstwach pod nim położonych następuje zamiana energii grawitacyjnej swobodnego spadku na promienistą. Opadanie może zachodzić na kilka rodzajów obiektów będących składnikami układów podwójnych: gwiazdy ciągu głównego, białe karły (BK) i gwiazdy neutronowe (GN).

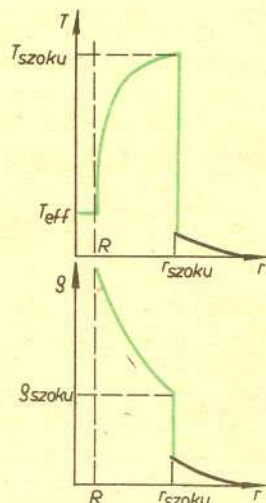
Gwiazdy ciągu głównego absorbują część energii wydzielanej w szoku i reagują bardzo gwałtownie na akrecję zwiększając promień i jasność nawet kilkaset razy. Proces ten przebiega do momentu, gdy albo gwiazda przyjmująca materię wypełni swoją powierzchnię Roche'a (układ kontaktowy), albo pierwszy składnik odda tyle materii, że aby utrzymać równowagę, będzie musiał skurczyć się i przepływ przez L_1 ulegnie przerwaniu. BK i GN podobnie reagują na akrecję. W następstwie chłodzenia gorącej plazmy w obszarze fali uderzeniowej emitowane jest promieniowanie X i ultrafioletowe (UV). Produkcja kwantów zachodzi w dwóch charakterystycznych procesach: promieniowanie hamowania, czyli rozpraszanie elektronów na jonach z jednoczesną emisją kwantów γ i chłodzenie Comptona, czyli rozpraszanie niskoenergetycznych fotonów na wysokoenergetycznych elektronach. Modelując odpowiednio obszar emisyjny można w sposób teoretyczny odtworzyć widmo obserwowane i rozstrzygnąć czy mamy do czynienia z GN, czy z BK. BK są bardzo silnymi źródłami promieniowania UV, co może stanowić wygodne kryterium odróżniania ich od GN.

Akrecja kolumnowa

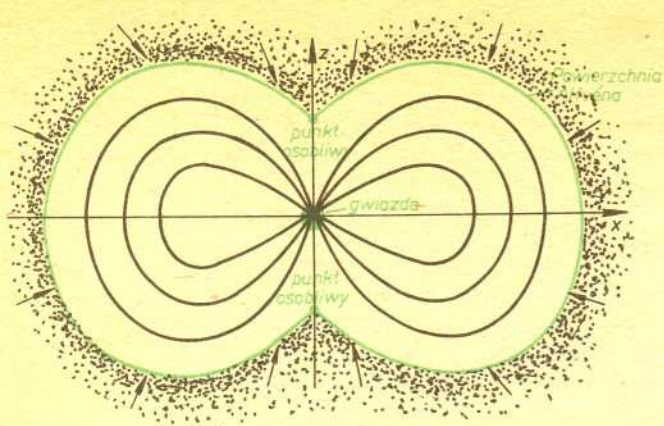
Ten rodzaj akrecji zachodzi na gwiazdy (BK, GN) z silnym polem magnetycznym. W przypadku silnych pól magnetycznych (np. dla BK zmierzona wartość indukcji wynosi 10^6 – 10^8 gausów) opadająca materia zostaje powstrzymana wysoko nad powierzchnią gwiazdy przez ciśnienie magnetyczne. Gwiazda znajduje się wewnątrz kokonu (powierzchnia Alfvéna) podpieranego przez linie sił pola. Przenikanie materii na



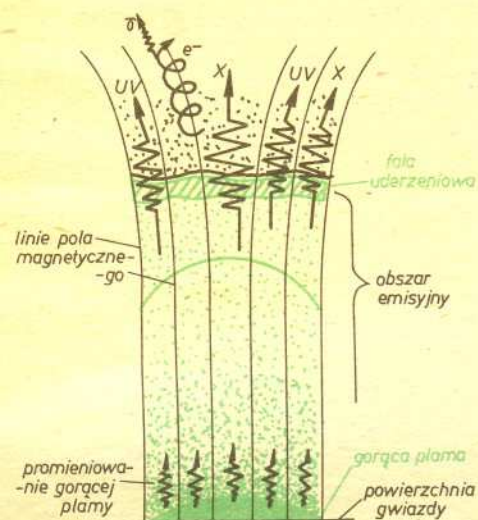
Rys. 4



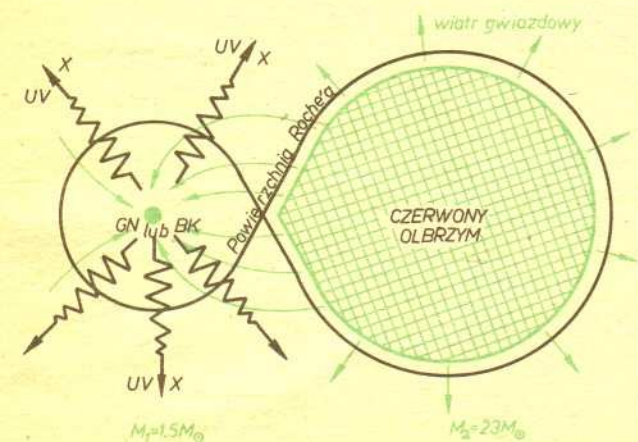
Powierzchnię, na której energia kinetyczna spadającej materii jest równa energii pola magnetycznego, nazywamy powierzchnią Alfvéna. Dla tej powierzchni prawdziwy jest związek: $\frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{H^2}{8\pi}$, gdzie lewa strona opisuje ciśnienie opadającej plazmy (ρ — gęstość, V — prędkość spadku), wielkość zaś po prawej stronie nosi nazwę ciśnienia magnetycznego (H — natężenie pola magnetycznego).



Rys. 5



Rys. 6



Rys. 7

powierzchnię gwiazdy może zachodzić w dwojaki sposób:
 — prostopadle „przebijanie” linii pola na skutek niestabilności,
 — sływanie wzdłuż linii pola na bieguny magnetyczne — akrecja kolumnowa.

Dla przypadku pola dipolowego powierzchnia Alfvéna ma dwa punkty osobliwe w okolicach biegunów, przez które materia nie może przenikać, a jedynie gromadzi się w ich okolicy. Odległość tych punktów od powierzchni gwiazdy zależy od ciśnienia materii, czyli od tempa akrecji \dot{M} . Im większe \dot{M} , tym punkty osobliwe bardziej zbliżają się do powierzchni, aż dla pewnej granicznej wartości ją osiągają. Tworzy się wtedy kolumna akrecyjna. Podobnie, jak w przypadku sferycznie symetrycznym, w kolumnie powstaje fala uderzeniowa i kształtuje się obszar emisyjny. Różnica polega na tym, że część energii ($\approx 1/2$) wydzielonej w szoku ogrzewa podstawę kolumny tworząc gorącą plamę. Inne są także mechanizmy promieniowania odpowiedzialne za kształt widma obiektu.

Nowym procesem jest emisja cyklotronowa polegająca na wytwarzaniu kwantów energii przez elektrony poruszające się po linii śrubowej wzdłuż linii pola magnetycznego. Promieniowanie hamowania i gorąca plama dają podobny wkład do widma jak w przypadku sferycznie symetrycznym. Modele teoretyczne widm i przewidywania dotyczące pulsacyjnego zachowania niektórych obiektów w pełni zostały potwierdzone przez obserwacje. Jednocześnie skala czasowa pulsów (GN rotuje znacznie szybciej niż BK), jak również numeryczne symulacje widma emisyjnego kolumny pozwoliły dla niektórych przypadków ustalić, czy badanym składnikiem układu podwójnego jest BK, czy GN.

Silny wiatr gwiazdowy z towarzysza

W sytuacji ewolucyjnej, gdy jeden składnik układu podwójnego jest BK lub GN, a drugi, bardziej masywny, znajduje się w fazie czerwonego olbrzyma i prawie wypełnia swoją powierzchnię Roche'a, następuje częściowa utrata masy z olbrzyma. Z teoretycznych modeli i obserwacji wiemy, że w tym przypadku utrata masy zachodzi w postaci wiatru gwiazdowego. W sytuacji, gdy wiatr gwiazdowy jest dość efektywny, by utrzymać czerwonego olbrzyma wewnątrz jego powierzchni Roche'a, pole magnetyczne BK czy GN oddziałując na ten wiatr wywołuje silną emisję rentgenowską (emisja cyklotronowa, promieniowanie hamowania). Układy podwójne, w których jedna gwiazda jest olbrzymem, a druga BK lub GN i w których wymiana masy zachodzi w postaci wiatru gwiazdowego, nazywane są masywnymi układami rentgenowskimi.

Co mówią obserwacje?

Ostatnie dwudziestolecie przyniosło zmianę jakościową w technikach obserwacyjnych. Zaczęto wykorzystywać możliwości, jakie dają obserwacje satelitarne, nie obciążone wszystkimi ziemskimi mankamentami. Z obserwacji pozaatmosferycznych uzyskano potwierdzenie rentgenowskiego i ultrafioletowego promieniowania układów z akrecyjnym BK (niektóre polary, np. AM Her), jak również pulsacyjnego charakteru niektórych zwartych źródeł (Her X-1, Cen X-3). Układ AM Her obserwowano w dziedzinie rentgenowskiej, a z obserwacji polarymetrycznych w widzialnej części widma oszacowano indukcję pola magnetycznego na 10^8 gausów. Wreszcie, gdy chodzi o akrecyjne gwiazdy ciągu głównego, to w układach typu Algol (np: SV Cen, β Lyr) w szybkiej fazie wymiany masy (\dot{M} od 10^{-4} do $10^{-5} M_{\odot}/\text{rok}$) mamy prawdopodobnie do czynienia z przypadkiem akrecji sferycznie symetrycznej. Podsumowując — trzeba podkreślić, że przedstawione w artykule zjawiska akrecyjne są tylko wąskim pasmem całej szerokiej klasy — bo materia ciągle płynie: w ramionach spiralnych i na jądra galaktyk, na czarne dziury i kwazary.