

Granica Eddingtona

Marcin KIRAGA

Sir Arthur Eddington (1882–1944) był wybitnym astrofizykiem pierwszej połowy XX wieku. Jednym z bardziej znanych wyników jego prac jest stwierdzenie roli, jaką w masywnych gwiazdach spełnia ciśnienie promieniowania. Dlatego krytyczną jasność gwiazdy, przy której gradient ciśnienia promieniowania równoważy siłę przyciągania grawitacyjnego, nazywamy dziś jasnością Eddingtona L_E . Dla sferycznie symetrycznej gwiazdy o masie M wynosi ona

$$L_E = 4\pi GMc/\kappa,$$

gdzie G jest stałą prawitacji, c prędkością światła, a κ średnim współczynnikiem pochłaniania promieniowania na jednostkę masy. Zatem w zależności od masy, składu chemicznego, temperatury i gęstości warstw powierzchniowych każda gwiazda ma swoją własną wartość jasności Eddingtona. Warto jednak ocenić jej górne ograniczenie, które będzie dotyczyło gwiazd gorących. Otóż współczynnik pochłaniania κ jest najmniejszy, gdy ośrodek jest całkowicie zjonizowany, a promieniowanie jest rozpraszane na swobodnych elektronach. W dodatku w tej sytuacji wartość współczynnika pochłaniania nie zależy od długości fali (taki ośrodek nazywany jest szarym). W przybliżeniu wynosi ona

$$\kappa = 0,2(1 + X) \text{ cm}^2/\text{g},$$

gdzie X oznacza wagową zawartość wodoru w materii gwiazdy. Maksymalna jasność Eddingtona, wyrażona w jasnościach i masach Słońca przy typowym $X = 0,7$, wynosi wtedy

$$L_E = 39\,000 L_\odot \frac{M}{M_\odot}.$$

Jak widać, Słońce jest obecnie daleko od granicy Eddingtona. Są jednak gwiazdy, których duża jasność powoduje kłopoty ze stabilnością zewnętrznych warstw. Na przykład, jasność gwiazd ciągu głównego silnie zależy od ich masy i gwiazda o masie 100 mas Słońca powinna mieć już jasność bliską jasności Eddingtona, czyli kilka milionów razy większą niż Słońce.



Przy temperaturze wynoszącej kilkanaście tysięcy kelwinów materia gwiazdy nie jest całkowicie zjonizowana, więc jej nieprzezroczystość κ jest większa niż u gwiazd gorętszych. Dlatego wśród gwiazd chłodniejszych od 10 000 K nie ma gwiazd o bardzo wysokiej jasności (jest to tzw. granica Humphreysa–Davidsona). Najmasywniejsze gorące gwiazdy, opuszczając w wyniku ewolucji ciąg główny, nie mogą – pęczniąc – znacznie obniżyć swojej temperatury powierzchniowej, bo towarzyszyłby temu wzrost nieprzezroczystości, a tym samym możliwość osiągnięcia granicy Eddingtona. Dlatego też czerwonym nadolbrzymem może stać się gwiazda o masie nieprzekraczającej około 30 mas Słońca. Bardzo jasne (masywne) gwiazdy o niskich temperaturach obserwuje się wyjątkowo, a osiągnięcie przez nie granicy Eddingtona zawsze może zaowocować niestabilnością warstw zewnętrznych i znaczną utratą masy (co prawdopodobnie obserwujemy w erupcjach bardzo jasnych i gorących gwiazd zmiennych).

Jasne gwiazdy tracą jednak znaczną część swojej masy na skutek wiatru napędzanego przez ich promieniowanie, nawet jeżeli ich jasność jest znacznie poniżej jasności Eddingtona. Wynika to z obecności w ich atmosferach częściowo zjonizowanych pierwiastków odpowiedzialnych za wysoką nieprzezroczystość. Przykładem takich gwiazd o jasności bliskiej krytycznej i o szczególnie silnych

wiatrach gwiazdowych są gwiazdy Wolfa–Rayeta, które powstają w wyniku ewolucji najmasywniejszych gwiazd ciągu głównego.

A co z naszym Słońcem? Obecnie jego własne promieniowanie nie ma praktycznie żadnego wpływu na utratę masy (wiatr słoneczny pochodzi z gorącej korony), ale na ostatnim etapie ewolucji będzie jednym z decydujących czynników. Rozmiary fotosfery Słońca i jego jasność staną się – odpowiednio – kilkaset i kilka tysięcy razy większe niż obecnie. Jasność będzie stanowiła około 10% maksymalnej jasności Eddingtona, ale w okresie kilkudziesięciu tysięcy lat rozległa otoczka zostanie rozproszona. Odświeżone jądro będzie przez następne kilkanaście tysięcy lat oświetlało rozszerzającą się mgławicę planetarną i stanie się typowym białym karłem.

Pojęcie jasności Eddingtona stosuje się również do obiektów, które swoją energię promieniowania czerpią z akrecji materii. W przypadku czarnych dziur niemających powierzchni, w którą może uderzyć opadająca materia, sferycznie symetryczna akrecja zawsze będzie dawała jasność znacznie mniejszą od L_E . Ale w przypadku istnienia dysku akrecyjnego możliwe jest przekroczenie jasności Eddingtona. Mianowicie materia może służyć w płaszczyźnie równikowej i być wyrzucana (na skutek pochłaniania promieniowania i innych czynników) z obszaru centralnego w kierunku do niej prostopałym.