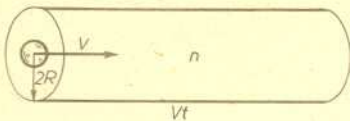


# Czy gwiazdy się zderzają?

Mgr Mirosław GIERSZ

Rozpatrzmy układ składający się z gwiazd nie oddziałujących grawitacyjnie, o jednakowych masach  $M$  i promieniach  $R$ , poruszających się z prędkościami  $V$ . W ciągu czasu  $t$  wybrana gwiazda przebywa drogę  $Vt$  zamiatając obszar przestrzeni o objętości  $W = Vt \cdot \pi(2R)^2$ .



Jeśli przez  $n$  oznaczymy gęstość gwiazd, to iloczyn  $n \cdot W$  podaje średnią liczbę gwiazd napotkanych w czasie  $t$ . Zatem średnio zderzenie nastąpi, gdy  $nW \approx 1$ . Stąd wynika średni czas między zderzeniami:

$$t \approx \frac{1}{4\pi R^2 V n}$$
$$\approx 2 \cdot 10^{20} \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 V[\text{km/s}] n \left[\frac{\text{gwiazd}}{\text{pc}^3}\right] [\text{lat}].$$

Gwiazdy znajdują się w „nieskończoności”, gdy energia potencjalna ich wzajemnego oddziaływania jest zaniedbywalnie mała w porównaniu z energią kinetyczną ich ruchów własnych.

Jeżeli całkowita energia układu fizycznego, będąca sumą energii kinetycznej i potencjalnej, jest ujemna, mówimy, że układ jest związany, w przeciwnym przypadku układ nie jest związany i znaczna jego część (lub całość) ulegnie rozproszeniu.

Patrząc w pogodną noc na niebo nie możemy oprzeć się wrażeniu mnogości gwiazd. Po chwili zdajemy sobie jednak sprawę, że rozmiary gwiazd są znacznie mniejsze od ich wzajemnych odległości na sferze niebieskiej. To pierwsze wrażenie wyniesione z pobieżnej obserwacji nieba znalazło potwierdzenie w obserwacjach astronomicznych dokonanych znacznie precyzyjniejszymi przyrządami niż oko ludzkie. Z obserwacji tych wynika, że cechą charakterystyczną poznanego Wszechświata są olbrzymie odległości między obiektami astronomicznymi należącymi do jednej klasy, a więc gwiazdami, galaktykami, gromadami galaktyk itd.

W okolicach Słońca najbliższe gwiazdy znajdują się w odległości kilku parseków. Wydaje się więc, że przy tak dużych odległościach zderzenia gwiazd muszą być zjawiskiem niezwykle rzadkim. Czy istnieją zatem obiekty astronomiczne, w których zderzenia gwiazd są znacznie częstsze? Liczba zderzeń zależy między innymi od gęstości gwiazd. Im więcej gwiazd w stałej objętości, tym zderzenia są częstsze. Wszystkie obiekty astronomiczne mają wspólną cechę wewnętrzną budowy: gęstość ich jest największa w obszarach centralnych i maleje wraz z oddalaniem się od centrum. A więc musimy poszukiwać obiektów o największej gęstości gwiazd w obszarach centralnych. Okazuje się, że dobrymi kandydatami są centralne obszary jąder galaktyk i gromad kulistych. W najgęstszych obszarach tych obiektów gęstości gwiazd przekraczają dziesiątki milionów gwiazd na parsek sześcienny. Przy tak dużych gęstościach możemy spodziewać się od kilkudziesięciu (dla gromad kulistych) do kilku tysięcy (dla jąder galaktyk) zderzeń na miliard lat.

Czy zderzenia między gwiazdami mogą wpływać na ewolucję gromad kulistych bądź jąder galaktyk? Zanim odpowiemy na to pytanie, należy bliżej przyjrzeć się procesowi zderzenia gwiazd. Rozważmy w tym celu dwie identyczne gwiazdy o masie  $M$ , promieniu  $R$ , które poruszają się w dostatecznie dużej odległości od siebie (w „nieskończoności”) z prędkością względną  $V$ . Zgodnie z zasadą zachowania energii gwiazdy zbliżając się pod wpływem przyciągania grawitacyjnego zwiększają energię kinetyczną ruchu względnego. Na początku zderzenia, gdy gwiazdy stykają się powierzchniami, ich względna prędkość będzie większa lub równa prędkości

ucieczki z powierzchni gwiazdy  $U_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ . Dla Słońca prędkość ta wynosi około

620 km/s. Czas zderzenia jest bardzo krótki, jest on w przybliżeniu równy ilorazowi średnicy gwiazdy i prędkości  $U_{esc}$  — dla Słońca wynosiłby około czterdziestu minut. Podczas zderzenia powstają bardzo silne fale uderzeniowe, które przekazują swoją energię otaczającej materii ogrzewając ją. Ponieważ energia potrzebna na pobudzenie fal uderzeniowych pochodzi z energii kinetycznej gwiazd, mówimy, że fale uderzeniowe dyssypują energię kinetyczną. W wyniku zderzenia gwiazdy mogą utracić część masy, zlepiać się albo zostać całkowicie rozerwane. Jeżeli założymy, że zderzenie jest niesprężyste, co oznacza, że dyssypowana jest cała energia kinetyczna, to możemy otrzymać proste kryterium pozwalające ocenić wynik zderzenia.

Energia  $\Delta E_d$  dyssypowana podczas zderzenia części gwiazd o masach  $m$  (mniejszych lub równych  $M$ ) wynosi w przybliżeniu  $\Delta E_d \approx m \left(\frac{U_{esc}}{2}\right)^2$ . Jeżeli gwiazdy w chwili początkowej są daleko,

ich całkowita energia jest równa energii kinetycznej  $E_{\infty} = M \left(\frac{V}{2}\right)^2$  i jest większa od zera,

czyli układ początkowo nie jest związany. Jeżeli w wyniku zderzenia całkowita energia  $E_w$  będzie ujemna, to gwiazdy mogą zlepiać się. Skorzystajmy teraz z zasady zachowania energii, która mówi, że  $E_{\infty} = \Delta E_d - |E_w|$ , czyli  $\Delta E_d = E_{\infty} + |E_w| > E_{\infty}$ . A więc zlepianie gwiazd będzie zachodzić, jeśli energia dyssypowana będzie większa od początkowej energii kinetycznej gwiazd.

W przeciwnym przypadku możemy spodziewać się tylko rozproszenia nieznacznej części materii gwiazd w otaczającej przestrzeni. Aby wyznaczyć, w jakich warunkach nastąpi całkowite rozerwanie gwiazd, rozważmy (podobnie jak wyżej) najprostszą sytuację, w której dwie identyczne gwiazdy, poruszające się w „nieskończoności” z prędkością względną  $V$ , zderzają się centralnie. W zderzeniu centralnym cała energia kinetyczna zamieniana jest na energię termiczną i rozerwanie gwiazd jest możliwe, jak to wynika z zasady zachowania energii, jeżeli początkowa energia kinetyczna gwiazd będzie większa od ich energii wiązania. Przy pewnych upraszczających

założeniach energia wiązania gwiazdy wynosi  $-3 \frac{GM^2}{R}$ . Początkowa energia kinetyczna

równa jest  $M \left(\frac{V}{2}\right)^2$ , zatem rozerwanie gwiazd będzie możliwe, gdy  $V > \sqrt{\frac{12GM}{R}} = \sqrt{6} U_{esc}$ .

Dla dwu identycznych gwiazd typu Słońca prędkość ta wynosi około 1,5 tys. km/s.

Model zderzenia omawiany powyżej jest bardzo prosty, nie uwzględnia on wielu istotnych procesów fizycznych zachodzących podczas zderzenia. Jednakże model ten poprawnie przewiduje, od jakich parametrów zależy końcowy produkt zderzenia gwiazd. Tymi parametrami są: prędkość gwiazd w „nieskończoności”, odległość w pericentrum (najmniejsza odległość między środkami gwiazd), masy i rozmiary gwiazd.

Jak już wspomniałem na początku artykułu, zderzenia gwiazd zachodzą dostatecznie często w centralnych obszarach jąder galaktyk i gromad kulistych. Gromady kuliste i jądra galaktyk różnią się znacznie nie tylko rozmiarami, ale przede wszystkim średnimi prędkościami

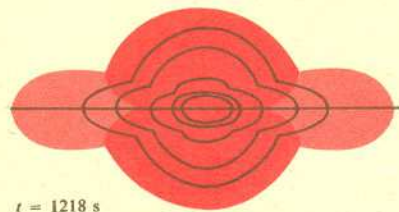
Na rysunkach przedstawione są wyniki symulacji numerycznej zderzenia centralnego dwu identycznych gwiazd typu Słońca. Kontury od centrum na zewnątrz odpowiadają gęstościom równym 1, 0,5, 0,1, 0,01, 0,001 gęstości centralnej. Obszary jaśniejsze przedstawiają materię uciekającą.



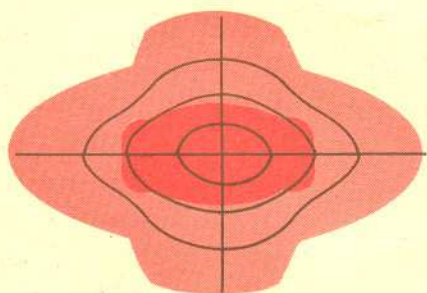
$t = 0 \text{ s}$



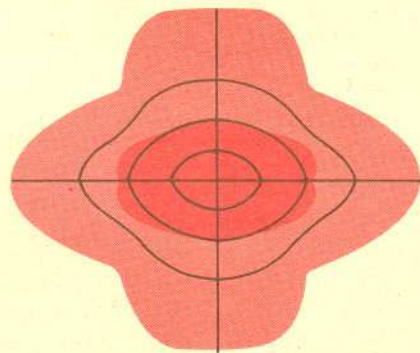
$t = 801 \text{ s}$



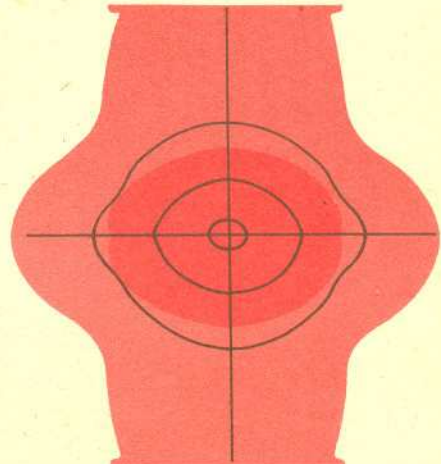
$t = 1218 \text{ s}$



$t = 1700 \text{ s}$



$t = 1817 \text{ s}$



$t = 2350 \text{ s}$

gwiazd. Prędkości średnie w centralnych obszarach gromad kulistych wynoszą kilkanaście km/s, natomiast w jądrach galaktyk przewyższają prawdopodobnie tysiąc km/s. W związku z tym w gromadach kulistych powinny dominować zderzenia prowadzące do zlepiania gwiazd i rozproszenia w otaczającej przestrzeni niewielkiej części masy gwiazd. W jądrach galaktyk natomiast dominować będą zderzenia prowadzące do rozerwania gwiazd albo do rozproszenia w przestrzeni znacznej części ich masy.

Zarówno jądra galaktyk, jak i gromady kuliste składają się z gwiazd ciągu głównego, białych karłów i niewielkiej ilości gwiazd neutronowych (ewentualnie czarnych dziur powstałych w wyniku ewolucji gwiazd). Wszystkie te rodzaje gwiazd biorą udział w zderzeniach, jednakże najbardziej spektakularne są zderzenia gwiazd ciągu głównego z białymi karłami lub gwiazdami neutronowymi (zderzenia białych karłów i gwiazd neutronowych są mało prawdopodobne ze względu na ich małe rozmiary). Podczas zderzenia energia kinetyczna zamieniana jest poprzez fale uderzeniowe na energię termiczną materii, czyli temperatura gęstych obszarów zderzających się gwiazd znacznie wzrasta. Fala uderzeniowa powstająca tuż nad powierzchnią białego karła powoduje wzrost temperatury otaczającej materii do wartości większych niż sto milionów kelwinów. Przy tak wysokich temperaturach następuje bardzo gwałtowne palenie wodoru, energia wydzielana w tym procesie jest porównywalna z energią wiązania gwiazdy, jest ona tego samego rzędu co energia wybuchu supernowej. Tak więc możemy spodziewać się jeżeli nie całkowitego rozerwania gwiazdy ciągu głównego, to przynajmniej odrzutu znacznej części jej masy. W zderzeniu gwiazdy ciągu głównego i białego karła rozerwanie gwiazdy związane jest z gwałtownym wydzieleniem energii w reakcjach termojądrowych i nie zależy od prędkości względnej w „nieskończoności”.

Na zakończenie zastanówmy się, w jaki sposób zderzenia gwiazd mogą wpływać na ewolucję centralnych obszarów jąder galaktyk i gromad kulistych. Przybliżoną strukturę dużych systemów gwiazdowych określają dwie wielkości: całkowita energia  $E_T$  i masa układu  $M_T$ . Dodatkowo, w przybliżeniu, w systemie spełnione jest tzw. twierdzenie o wirale, wiążące energię potencjalną  $E_p$  z energią całkowitą:  $E_p = 2E_T$ . W przybliżeniu energia potencjalna proporcjonalna jest do  $-\frac{GM_T^2}{R_T}$  ( $R_T$  — jest to charakterystyczny promień systemu). W zderzeniach gwiazd tracąca jest energia kinetyczna, co powoduje zmniejszanie się całkowitej energii  $E_T$ . Zgodnie z twierdzeniem o wirale reakcją systemu na zmniejszanie  $E_T$  będzie zmniejszanie się jego rozmiarów. System staje się bardziej związany (należy pamiętać, że w związanych systemach gwiazdowych energie  $E_T$  i  $E_p$  są ujemne). Z drugiej strony wiemy, że zderzenia gwiazd związane są także z wyrzutem większej lub mniejszej ilości materii z prędkościami kilkudziesięciu km/s. Jeżeli wyrzucona materia będzie miała prędkość większą od prędkości ucieczki z systemu gwiazdowego, to opuszczając system będzie wykonywała pracę pokonując jego przyciąganie, tym samym zwiększając energię systemu i jego promień. Widzimy więc, że zderzenia gwiazd zmieniają energię całkowitą systemu powodując tym samym jego ewolucję.

Jądra galaktyk są obiektami bardzo masywnymi ( $M \approx 10^{10} M_\odot$ ), prędkości ucieczki wynoszą w nich kilka tysięcy km/s. Zatem materia wyrzucana podczas zderzeń będzie sphywała do obszarów centralnych tworząc masywny dysk. Jak się przypuszcza, w dysku tym mogą zachodzić gwałtowne procesy prowadzące do tworzenia nowych gwiazd. Gromady kuliste są obiektami znacznie mniej masywnymi ( $M \approx 10^5 M_\odot$ ), dla których prędkości ucieczki są rzędu trzydziestu km/s. Tak więc materia wyrzucana podczas zderzeń będzie opuszczała gromadę powodując zwiększenie jej energii całkowitej. Jeżeli energia dostarczana do systemu przez uciekającą materię jest większa od energii traconej podczas zderzeń, to jądro gromady będzie zwiększało swoje rozmiary. W przeciwnym przypadku — gdy energia dyssypowana przeważa, jądro gromady będzie zmniejszało swoje rozmiary.

Poznanie budowy i ewolucji dużych systemów gwiazdowych pozwoli zapewne odpowiedzieć na wiele interesujących pytań. A mianowicie — jakiego rodzaju obiekty znajdują się w jądrach dużych systemów gwiazdowych, jakie procesy prowadzą do generacji lub dyssypacji energii. W chwili obecnej jesteśmy na etapie odkrywania, katalogowania i włączania nowych procesów do badań ewolucji dużych systemów gwiazdowych.