

Współczesny model ewolucji gromad kulistych

Mgr Mirosław GIERSZ

Gromady kuliste są jednymi z najstarszych, a zarazem najprostszych systemów gwiazdowych. Ich wiek porównywalny z wiekiem Wszechświata (około 10 miliardów lat) sprawia, że są one ważnym ogniwem w rozumieniu procesów zachodzących podczas formowania galaktyk. Prosta struktura gromad, wykazująca wiele symetrii, sprawia, że są one dla astronomów doskonałym „poligonem”, na którym uczą się oni badania dynamicznej ewolucji bardziej złożonych obiektów astronomicznych: jąder galaktyk, galaktyk i gromad galaktyk.

Gromady kuliste są masywnymi, sferycznie symetrycznymi systemami gwiazdowymi o rozmiarach 50–100 parseków, złożonymi z dziesięciu tysięcy do miliona gwiazd o koncentracji wzrastającej w kierunku centrum. Rozmiary gromad kulistych ograniczone są przez oddziaływanie z Galaktyką. Siły pływowe wywołane przez Galaktykę powodują „wyrwanie” z gromady gwiazd, których odległości od centrum przekraczają krytyczny promień zwany promieniem przyływowym.

Ewolucja gromad kulistych może być umownie podzielona na trzy okresy.

Pierwsza epoka związana jest z początkowym zapadaniem się (kolapsem) pierwotnego obłoku gazowego do stanu bliskiego równowagi, czyli stanu, w którym suma energii potencjalnej i podwojonej energii kinetycznej jest równa zero. Okres ten zwany jest gwałtowną relaksacją i jest najkrótszym okresem w życiu gromady kulistej. Trwa on od kilku do kilkunastu milionów lat. W wyniku gwałtownej relaksacji w gromadzie kulistej powstają dwa obszary: wewnętrzny obszar o dużej gęstości, zwany jądrem, charakteryzujący się izotropowym i zbliżonym do maxwellowskiego rozkładem prędkości oraz zewnętrzny, zwany halo, w którym gwiazdy poruszają się po wydłużonych orbitach.

Następna epoka związana jest z powolnym, trwającym wiele miliardów lat zapadaniem się wewnętrznych obszarów gromady kulistej i rozbudową halo. Okres ten zdominowany jest głównie przez ciągłą ucieczkę z gromady gwiazd o dużych prędkościach z praktycznie zerową energią całkowitą. Proces ten nazywany jest „parowaniem” gwiazd. W dużych systemach gwiazdowych, a więc i w gromadach kulistych głównymi czynnikami wymuszającymi ewolucję są odległe spotkania między gwiazdami powodujące małe zmiany prędkości przelatujących względem siebie gwiazd. Spotkania te podtrzymują proces „parowania” gwiazd z gromady, ponieważ w ich wyniku pojawiają się gwiazdy o dużych prędkościach. Prowadzą one także do wyrównywania energii kinetycznej gwiazd o różnych masach (ekwipartycja energii). Proces ten jest czynnikiem przyspieszającym rozdzielanie (segregację) gwiazd o różnych masach w gromadzie: gwiazdy cięższe gromadzą się w centralnych obszarach gromady, podczas gdy gwiazdy lżejsze poruszają się głównie w halo. „Parowanie” gwiazd z centralnych obszarów gromady kulistej powoduje wzrost energii wiązania jądra, czyli wzrost gęstości i średniej prędkości gwiazd. Na tym etapie ewolucji jądro gromady zwiększając swoją energię wiązania (zapadając się) dostarcza poprzez „parujące” gwiazdy energii do halo, powodując jego rozbudowę i powolne rozpraszanie w otaczającej przestrzeni. Tak więc zapadające się jądro jest źródłem energii pochłanianej przez resztę gromady.

Przedstawiony powyżej początkowy okres ewolucji gromady kulistej możemy łatwiej zrozumieć przez analogię do protogwiazd, w których wewnątrz nie „rozpały” się jeszcze reakcje termojądrowe. Zapadanie się centralnych obszarów jest głównym źródłem energii w obu przypadkach. Energia ta w protogwiazdach przekazywana na zewnątrz powoduje świecenie oraz rozpraszanie znacznej części otoczki w otaczającej przestrzeni. Dla gromad kulistych odpowiednikiem tego procesu jest „parowanie” gwiazd powodujące rozbudowę i rozpraszanie halo oraz zmniejszanie energii wiązania gromady. W protogwieździe po osiągnięciu ciągu głównego włączają się nowe, wydajniejsze źródła energii związane z reakcjami termojądrowymi zachodzącymi w jej wnętrzu („spalanie” wodoru w hel). Podobną sytuację spotykamy w gromadach kulistych, kiedy to liczne procesy związane z gwiazdami tworzącymi gromadę stają się ważnym czynnikiem określającym jej dalszą ewolucję.

Możemy do nich zaliczyć: wpływ z gromady materii odrzuconej podczas ewolucji gwiazd oraz powstawanie układów podwójnych w wyniku oddziaływań przyływowych między dwiema gwiazdami (energia ruchu względnego przelatujących obok siebie gwiazd, przekazywana przez siły pływowe, powoduje zwiększenie ich energii wewnętrznej — gwiazdy zaczynają oscylować). Wpływ materii związany z ewolucją gwiazd odgrywa ważną rolę na początku drugiej epoki, kiedy segregacja gwiazd nie jest wyraźna. Utrata masy przez najcięższe gwiazdy powoduje zmniejszenie średniej gęstości gwiazd i energii wiązania gromady. Pozostałości



Okres gwałtownej relaksacji związany jest z przebudową struktury pierwotnego obłoku gwiazdowego, czyli z procesami, które zachodzą w najkrótszej skali czasowej. Skala ta odpowiada okresowi, po którym gwiazda poruszająca się z typową dla gromady kulistej prędkością (około 10 km/s) pokona odległość równą promieniowi gromady. Jest to tzw. czas przelotu i w typowych gromadach kulistych wynosi około miliona lat.

W wyniku wielokrotnych, odległych spotkań między gwiazdami ich prędkości ulegają znacznym zmianom. Czas, po którym zmiany energii wywołane wielokrotnymi spotkaniami między gwiazdami będą równe początkowej energii kinetycznej, nazywamy czasem relaksacji. Typowy czas relaksacji w gromadach kulistych wynosi około miliarda lat.



Rozwiązanie zadania M 404. Niech n będzie

liczbą naturalną większą od $\frac{2}{\sin \frac{\pi}{2000}}$.

Weźmy takie $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$, że $\sin \alpha = \frac{2n}{n^2+1}$.

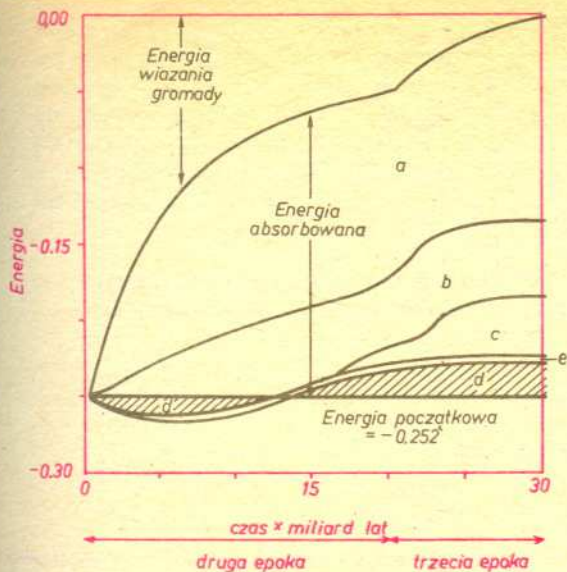
Mamy $\alpha < \frac{\pi}{2000}$, ponieważ $\sin \alpha =$

$$= \frac{2n}{n^2+1} < \frac{2}{n} < \sin \frac{\pi}{2000} \text{ i } \cos \alpha =$$

$$= \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{\frac{n^4 + 2n^2 + 1 - 4n^2}{(n^2 + 1)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(n^2 - 1)^2}{(n^2 + 1)^2}} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}.$$

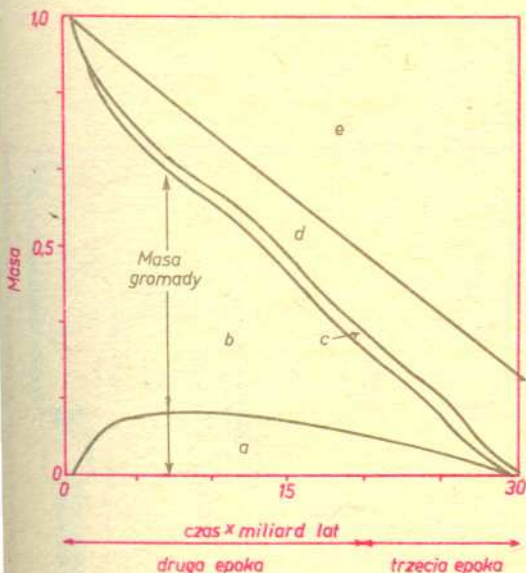
Korzystając ze wzorów $\sin(k+1)\alpha = \sin k\alpha \cos \alpha + \sin \alpha \cos k\alpha$, $\cos(k+1)\alpha = \cos k\alpha \cos \alpha - \sin k\alpha \sin \alpha$ przez indukcję otrzymujemy, że $\sin k\alpha$ i $\cos k\alpha$ są wymierne dla dowolnej liczby naturalnej k . Weźmy teraz dowolny punkt A_0 na danym okręgu i niech A_k będzie obrazem A_0 przy obrocie (zgodnie z ruchem wskazówek zegara) danego okręgu o kąt $2k\alpha$ ($k = 1, 2, \dots, 999$). Wówczas odległość $A_k A_m = 2 \sin |k-m|\alpha$ jest liczbą wymierną dla dowolnych $k, m \in \{0, 1, 2, \dots, 999\}$.



Energia wiązania gromady kulistej w zależności od czasu. Poszczególne obszary przedstawiają pochłanianą przez gromadę część energii produkowanej w wyniku: a) ewolucji gwiazd, b) powstawania układów podwójnych, c) powstawania układów potrójnych, d) relaksacji, e) powstawania fal uderzeniowych.



Rysunki zamieszczone w tekście pochodzą z pracy doc. J. Stodółkiewicza opublikowanej w materiałach z Sympozjum Nr 113 Międzynarodowej Unii Astronomicznej.



Zależność masy gromady kulistej od czasu. Poszczególne obszary oznaczają: a) masę gwiazd zwartych, b) masę gwiazd ciągu głównego, c) masę wyrzuconą z gwiazd w wyniku oddziaływania układów podwójnych z gwiazdą otoczenia, d) masę wyrzuconą w czasie ewolucji gwiazd, e) masę wyrzuconą w czasie procesów relaksacyjnych.

po zakończonej ewolucji gwiazd: białe karły, gwiazdy neutronowe i czarne dziury osiadają w wyniku segregacji mas w jądrze. Są to najmaszyniejsze obiekty w gromadzie — mają masy około $1 M_{\odot}$ (w obecnie istniejących gromadach kulistych najmaszyniejszymi gwiazdami ciągu głównego są gwiazdy o masie około $0,8 M_{\odot}$). Tak więc jądro gromady będzie się składało głównie z białych karłów, gwiazd neutronowych i czarnych dziur oraz niewielkiej domieszki gwiazd ciągu głównego. Pod koniec okresu gwałtownej utraty masy przez najcięższe gwiazdy pojawia się nowe źródło energii związane z powstawaniem układów podwójnych utworzonych ze zwartej gwiazdy i gwiazdy ciągu głównego. Układy podwójne w wyniku bliskich oddziaływań z gwiazdami otoczenia przekazują część swojej energii wiązania do gromady, czyli „ogrzewają” ją.

Energia produkowana przez układy podwójne na tym etapie ewolucji jest w stanie znacznie opóźnić zapadanie się jądra gromady kulistej. Jednakże w wyniku zderzeń między gwiazdami, „parowania” gwiazd z jądra i powstawania układów podwójnych liczba gwiazd ciągu głównego (niezbędnych w procesie tworzenia układów podwójnych w oddziaływaniach przytływowych) znacznie maleje. To powoduje, że układy podwójne powstające w oddziaływaniach między dwiema gwiazdami nie będą w stanie dostarczyć do gromady dostatecznej ilości energii, co

doprowadzi do ponownego, szybszego zapadania się jądra (zderzenia między gwiazdami powodują utratę energii kinetycznej gwiazd, przez co zwiększa się energia wiązania jądra). „Parowanie” gwiazd, wypływ materii związanej z ewolucją gwiazd oraz procesy związane z układami podwójnymi znacznie zmniejszają masę (liczbę gwiazd) i energię wiązania gromady. Tak więc w ostatniej fazie tej epoki gromada posiada małe, bardzo gęste jądro złożone praktycznie w całości z gwiazd zwartych i rozbudowane halo.

Gromadę kulistą w tym okresie możemy porównać do gwiazdy, w której wnętrzu wyczerpało się paliwo jądrowe. Jądro gwiazdy pozbawione termojądrowego źródła energii zapada się. Energia grawitacyjna wyzwolona w procesie kolapsu przekazywana jest do otoczki powodując jej rozbudowę, a nawet częściowe rozproszenie. Kolaps jądra trwa aż do momentu włączenia reakcji termojądrowych, w których biorą udział cięższe pierwiastki. Podobnie jest w gromadzie kulistej, kiedy to „pojawienie” się nowego źródła energii rozpoczyna trzecią epokę w jej życiu. Źródłem energii w trzeciej epoce są układy podwójne powstałe w oddziaływaniach między trzema gwiazdami, głównie białymi karłami i gwiazdami neutronowymi. Układy te mogą efektywnie ogrzewać system w oddziaływaniach z gwiazdami otoczenia jedynie w przypadku bardzo dużych gęstości (miliard gwiazd na parsek sześcienny; odpowiada to średniej odległości między gwiazdami około 200 jednostek astronomicznych) w jądrze zawierającym małą liczbę gwiazd (kilkaset). Ponieważ w okresie tym masa i energia wiązania gromady kulistej jest małym

ułamkiem początkowej masy i energii wiązania, źródło energii związane z układami podwójnymi (powstałymi w oddziaływaniach między trzema gwiazdami) staje się bardzo efektywne.

Energia wydzielona przez te układy spowoduje powolne mańenie gęstości centralnej gromady. Rozpocznie się ekspansja. Trzecia epoka trwa aż do momentu rozproszenia gromady kulistej w wyniku „parowania” gwiazd.

Okresowe przejścia gromady przez płaszczyznę Galaktyki są dodatkowym źródłem energii. W czasie tych przejść powstają fale uderzeniowe ogrzewające gromadę. Jednakże energia dostarczona w wyniku tego procesu do typowej gromady jest mała w porównaniu z innymi źródłami.

Przedstawiony opis ewolucji gromad kulistych wydaje się być prosty i jednoznaczny. Jednakże w rzeczywistości kryje on w sobie wiele zagadek i nie wyjaśnionych jeszcze problemów. Nie dziwny się jednak. Wszakże badania gromad kulistych mają bardzo krótką historię, której początki datuje się na 1917 r. Prace powstałe na początku lat osiemdziesiątych zdają się wskazywać, że jesteśmy bliscy momentu, kiedy przewidywania modeli teoretycznych będzie można porównać z danymi obserwacyjnymi, co przybliży nas do rozwiązania wielu zagadek związanych z obserwacjami obiektów pozagalaktycznych.