

MOCCA – nowe narzędzie do symulacji ewolucji gromad gwiazdowych

Gromady pełne maruderów



ARKADIUSZ HYPKI

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika
Polska Akademia Nauk, Warszawa
ahypki@camk.edu.pl

Mgr inż. Arkadiusz Hypki jest doktorantem w CAMK PAN, zajmuje się dynamiką układów gwiazdowych i symulacjami numerycznymi.

Kody numeryczne w astrofizyce pełnią szczególnie ważną funkcję. Pozwalają opisywać teorie fizyczne na podstawie równań matematycznych. Jeśli wyniki symulacji numerycznych zgadzają się z obserwacjami, to znaczy, że teoria fizyczna dobrze opisuje rzeczywistość

Gromadą gwiazdową nazywamy obiekt astronomiczny, który składa się z setek lub tysięcy gwiazd związanych ze sobą grawitacyjnie. Program MOCCA służy do symulacji ich ewolucji. Skrót pochodzi od angielskiej nazwy „MONte Carlo Cluster simulAtor”.

Do symulacji gromad stosuje się zwykle albo kody N-ciałowe, albo kody oparte na statystycznym rozwiązaniu równań Fokkera-Plancka. Kody N-ciałowe są dokładne – liczą oddziaływania pomiędzy wszystkimi gwiazdami w gromadzie. Ich niewątpliwą zaletą jest brak dodatkowych założeń dotyczących struktury gromad gwiazdowych. Wadę natomiast stanowi bardzo długi czas obliczeń, który sprawia, że symulacje rzeczywistych gromad, liczących początkowo przynajmniej kilkaset tysięcy gwiazd, są obecnie poza zasięgiem najszybszych klastrów komputerowych.

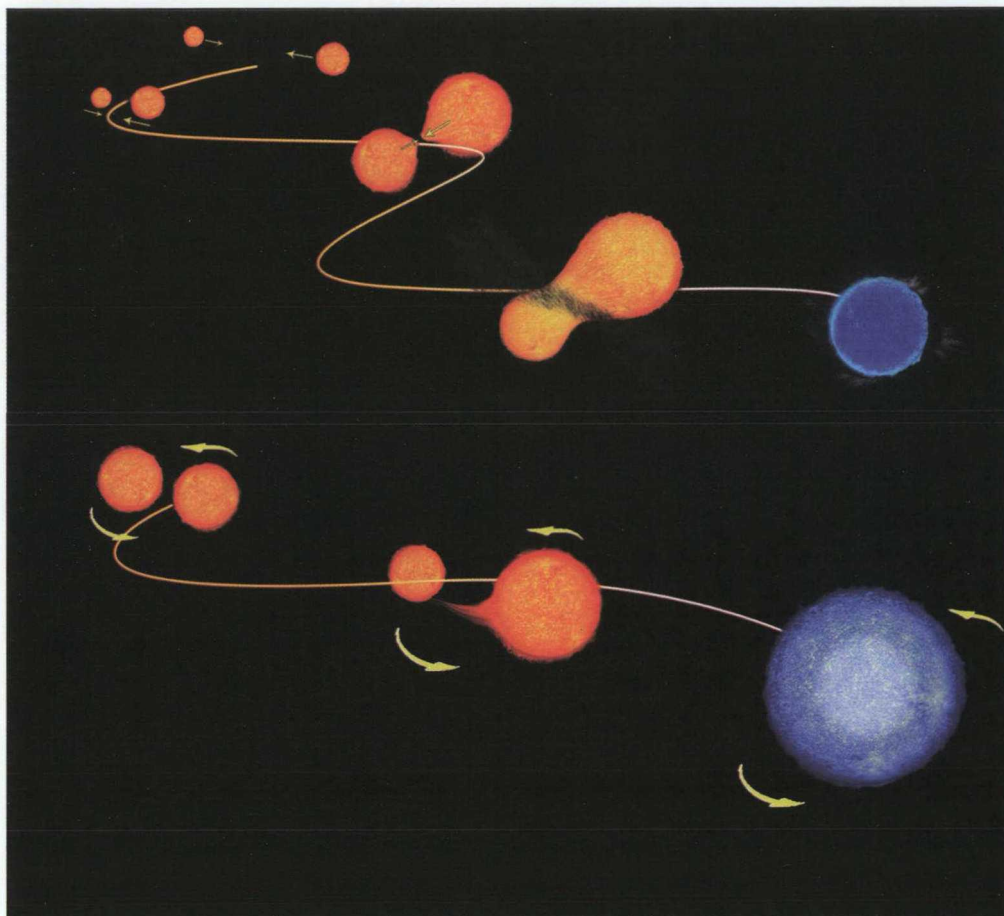
MOCCA należy do drugiej grupy kodów. Pierwszym głównym uproszczeniem jest tutaj założenie o sferycznej symetrii: każdą gwiazdę traktuje się jak sferę, a nie punkt w przestrzeni trójwymiarowej. Drugie ułatwienie polega na tym, że proces relaksacji, odpowiedzialny za redystrybucję energii w gromadzie, jest przybliżony tylko przez jedno oddziaływanie pomiędzy dwoma sąsiednimi gwiazdami.

Kod MOCCA jest rozwijany w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika PAN w Warszawie przez Mirosława Giersza i Arkadiusza Hypkiego. Ostatnio dodano do niego FEWBODY – kod N-ciałowy, który służy tu do przeprowadzania zderzeń pomiędzy gwiazdami pojedynczymi i podwójnymi oraz pomiędzy dwiema gwiazdami podwójnymi. Dzięki temu kod MOCCA zyskał m.in. możliwość dokładnego śledzenia powstawania i ewolucji szczególnych obiektów w gromadzie, np. gwiazd typu błękitni maruderzy, czarne dziury, gwiazdy kataklizmiczne itd. Ten dodatek uczynił kod MOCCA pewnego rodzaju hybrydą podejścia Monte Carlo oraz N-ciałowego. Symulacje są jeszcze bardziej zbliżone do rzeczywistości, a MOCCA jest obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych kodów numerycznych do symulacji gromad gwiazdowych. Śledzi ewolucję gromady podobnie jak kody N-ciałowe, ale jest przy tym bezkonkurencyjnie szybszy. W tym samym czasie, w którym daje się przeprowadzić jedną symulację N-ciałową, MOCCA potrafi policzyć setki symulacji dla różnego zestawu warunków początkowych. To pozwala badać statystyczne zmiany populacji interesujących nas obiektów w zależności od warunków początkowych w gromadzie.

Gwiazdy, które zabłądziły

Ostatnio kod MOCCA posłużył do zbadania kanałów powstawania gwiazd z grupy błękitnych maruderów (ang. Blue Stragglers, odąd w skrócie BM). BM stanowią szczególnie interesującą grupę gwiazd, ponieważ poprzez badanie ich właściwości można uzyskać ważne informacje dotyczące związku pomiędzy ewolucją gwiazdową a dynamiką gromad gwiazd. Nasza praca potwierdziła, że MOCCA jest doskonałym narzędziem do pełnej analizy ewolucji gromad gwiazdowych oraz porównań z obserwacjami.

Gwiazdy typu BM należą do tzw. ciągu głównego gwiazd, ale są od typowych gwiazd tego ciągu bardziej niebieskie i bardziej gorące. Większość gwiazd w trakcie swojej ewolucji „wędruje” po ciągu głównym, stając się coraz



ESA/ESA

Dwa główne kanały powstawania gwiazd typu błękitni maruderzy. Górny panel przedstawia fizyczną kolizję pomiędzy dwiema małowasywnymi gwiazdami, natomiast dolny panel obrazuje przepływ masy z bardziej masywnej gwiazdy na mniej masywną, co prowadzi do utworzenia błękitnego marudera

cieplejszymi i jaśniejszymi, aż do tzw. punktu odejścia – wtedy gwiazda zmienia swoje właściwości, schodzi z ciągu głównego i staje się czerwonym olbrzymem. Dla przykładu nasze Słońce jest gwiazdą ciągu głównego i spędzi w stanie relatywnego spokoju najbliższe kilka miliardów lat. Następnie, kiedy wypali w jądrze wodór, zejdzie z ciągu głównego i zmieni się w czerwonego olbrzyma. BM to gwiazdy, które „zabłądziły” na ciągu głównym i nie przekształciły się w czerwonego olbrzyma w tym samym czasie co inne gwiazdy – stąd ich nazwa. Fakt, że BM mają masy większe niż typowe dla punktu odejścia, świadczy o tym, iż musiały przejść w przeszłości jakiś epizod, w którym otrzymały dodatkową masę.

Znane z literatury dwa podstawowe mechanizmy, które mogą być za to odpowiedzialne, to transfer masy oraz zderzenie z inną gwiazdą ciągu głównego. Otrzymanie dodatkowej masy powoduje „odmłodzenie” gwiazdy i może ona spędzić jeszcze dodatkowy czas na ciągu głównym, zanim zmieni się w czerwonego olbrzyma.

W naszych badaniach dla różnych kanałów powstawania BM zaobserwowaliśmy różne procesy fizyczne, odpowiedzialne za ich utworzenie. Dla BM utworzonych przez transfer masy w układzie podwójnym gwiazd zaobserwowaliśmy dwie odrębne grupy: BM powstające dzięki przepływowi masy przez punkt Lagrange’a L1 oraz przez wiatry gwiazdowe i odrzucenie otoczki przez gwiazdę kompana, która zaczęła odchodzić od ciągu głównego.

BM utworzone w wyniku połączenia gwiazd w jednym układzie podwójnym powstawały w ciasnych układach gwiazd podwójnych z okresami orbitalnymi wynoszącymi około 1 dnia oraz z kołowymi lub prawie kołowymi orbitami. W ciągu pierwszych kilku miliardów lat istnienia gromady głównym procesem fizycznym był przepływ masy przez punkt L1, który prowadził do połączenia gwiazd. Dla układów powstałych po kilku mmiliardach lat połączenie gwiazd było najczęściej wynikiem działania hamowania magnetycznego. BM tworzone w wyniku kolizji w oddziaływaniach dyna-

MOCCA – nowe narzędzie do symulacji ewolucji gromad gwiazdowych



ESA/MESA, HST

Gromada kulista M53 z liczną grupą błękitnych maruderów (gwiazdy bardziej niebieskie od pozostałych)

micznych powstają głównie po kolapsie jądra gromady. Zaobserwowaliśmy tylko jeden przypadek utworzenia BM w wyniku kolizji pomiędzy dwiema pojedynczymi gwiazdami. Wszystkie inne BM zostały utworzone przy udziale układów podwójnych. Jest to szczególnie ważne dla obserwatorów, gdyż wskazuje na rolę układów podwójnych w ewolucji gromad gwiazdowych.

Jedną z ciekawszych zależności, jaką udało się nam zaobserwować, jest pojawienie się oznak bimodalnego rozkładu przestrzennego BM wraz z kolapsem jądra gromady dla naszej testowej symulacji. Dla gromady w wieku 4 mld lat liczba BM jest największa w centrum, a poza nim systematycznie maleje. Kolaps jądra dla testowej symulacji datowany jest na około 6-8 mld lat. Słabe oznaki bimodalnego rozkładu przestrzennego zaczynają być widoczne dla gromady w wieku 10 mld lat. Wtedy oprócz największej ich liczby w centrum zaobserwować można również wzrost liczebności tych obiektów w obszarze znacznie odleglejszym od centrum. Jest to o tyle ciekawy wynik, że gdyby bimodalny rozkład przestrzenny pojawiał się po kolapsie jądra dla wszystkich lub chociaż dla wielu różnych gromad, byłby to znakomity sposób na badanie dynamicznego statusu gromady.

Dla wielu BM zauważyliśmy znaczące opóźnienie pomiędzy wydarzeniem, które stworzyło taki obiekt (transfer masy lub fizyczna kolizja), a czasem wykrycia BM w gromadzie. Różnica ta może wynosić nawet kilka miliardów lat. Efekt ten dotyczy sporej liczby BM. Jest to ważna informacja dla ob-

serwatorów, gdyż oznacza to, że wiele tych ciekawych obiektów może być ukrytych na ciągu głównym.

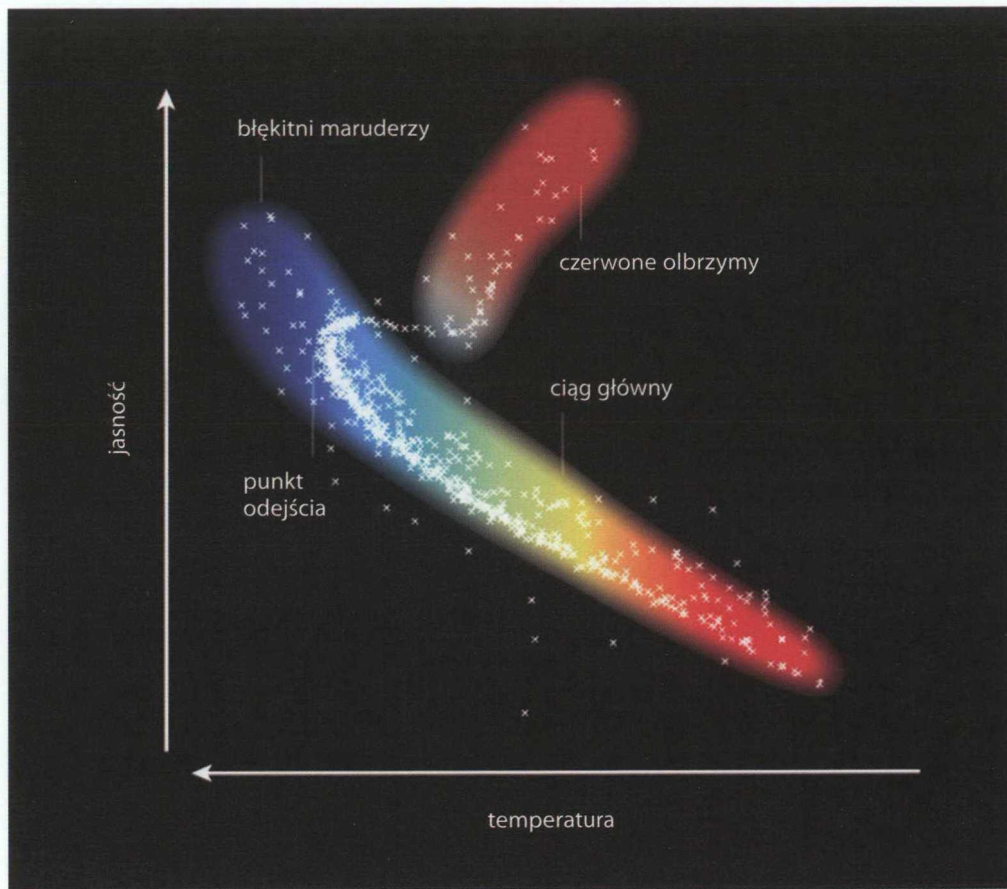
BM utworzeni w wyniku fizycznych kolizji (dynamiczni BM) w prawie wszystkich przypadkach szybko uciekli z gromady dzięki uzyskaniu dodatkowej energii kinetycznej podczas tych oddziaływań. Inne typy BM mogą uciec z gromady w wyniku procesów relaksacyjnych, znacznie mniej energetycznych. Nazwalibyśmy ich powolnymi uciekinierami. Ponadto interesująca jest procentowa liczba dynamicznych uciekinierów przed kolapsą jądra i po niej. Łącznie 43% z nich, będąc jeszcze BM, uciekło z gromady. Natomiast po kolapsie jądra liczba ta wzrosła do 60%, co czyni ten proces znaczącym dla obserwatorów. Można ich szukać w pobliżu gromad gwiazdowych.

Wymienione właściwości BM są tylko wybranymi przykładami pokazującymi, z jaką dokładnością i jak wydajnie i prosto MOCCA pozwala śledzić właściwości interesujących nas gwiazd.

Kody przyszłości

Do kodu MOCCA wprowadzane są coraz to nowsze funkcjonalności, które mają za zadanie uczynić go przydatnym dla jak najszerszej grupy naukowców. W przyszłości zamierzamy przeprowadzić systematyczną analizę populacji BM dla różnych warunków początkowych, funkcji mas, parametrów układów podwójnych, koncentracji, metaliczności oraz wielu innych. Naszym celem jest potwierdzenie istniejących i poszukanie dotychczas nieznanych korelacji pomiędzy parametrami populacji BM a parametrami opisującymi globalną strukturę gromad gwiazdowych.

W planach jest również udostępnienie bazy danych modeli oraz aplikacji internetowej, które pozwoli naukowcom z całego świata wyszukiwać warunki początkowe dla gromad gwiazdowych, podając ich obecnie obserwowane na niebie parametry. Tego typu projekt da się zrealizować tylko przy użyciu kodów, opartych na metodzie Monte Carlo. MOCCA nadaje się do tego zadania najlepiej. Liczymy, że tego typu internetowa baza danych zostanie dobrze przyjęta w środowisku naukowym i spowoduje jeszcze szersze zainteresowanie środowiska obserwatorów i dynamiki gwiazdowej.



PK węg materiałów Univ. Chicago press

Diagram Hertzsprunga-Russella, obrazujący ewolucję i klasyfikację gwiazd. Większość gwiazd z wiekiem zwiększa temperaturę i jasność, wędrując po tzw. ciągu głównym aż do momentu zwanego punktem odejścia, kiedy to zamieniają się w czerwone olbrzymy. Gwiazdy, które „zabłądziły” na ciągu głównym, noszą nazwę błękitnych maruderów

Obecnie MOCCA ma zaprogramowane procedury badania oddziaływań dla gwiazd pojedynczych oraz podwójnych. Ostatnie badania pokazały jednak, że w gromadach gwiazdowych – zwłaszcza w przypadku obiektów takich jak BM – ważną rolę mogą grać układy hierarchiczne (trójki, czwórki gwiazd oraz wyższe hierarchie). Dlatego w najbliższym czasie zostaną dodane do kodu odpowiednie funkcjonalności, które pozwolą śledzić ich ewolucję w gromadach gwiazdowych.

Kod MOCCA został już zaprezentowany na kilku międzynarodowych konferencjach, w tym podczas zjazdu Międzynarodowej Unii Astronomicznej w Pekinie w 2012 roku. Spotkał się z dużym zainteresowaniem obserwatorów oraz teoretyków. Naukowcy z innych grup badawczych zauważyli duży potencjał, jaki niesie ze sobą nasz kod. Jako przykład możemy podać nawiązanie nowej współpracy m.in. z projektem Cosmic-Lab kierowanym przez Francesca Ferrara. Cosmic-Lab jest pięcioletnim europejskim projektem badawczym, którego celem jest badanie złożonej relacji pomiędzy dynamiką a ewolucją gwiazdową w gromadach kulistych. Naszym pierwszym zadaniem będzie próba odtworzenia dwóch sekwencji BM obserwowanych w gromadzie M30. Innym projektem,

przy współpracy z Luigim R. Bedinem, jest poszukiwanie masywnych towarzyszy w gwiazdach podwójnych i porównywanie wyników z obserwacjami uzyskanymi przez Teleskop Kosmiczny Hubble’a.

Chcesz wiedzieć więcej?

Hypki A., Giersz M. (2012). *MOCCA code for star cluster simulations - I. Blue Stragglers, first results.* arXiv1207.6700H

Giersz M., Heggie D. C., Hurley J., Hypki, A. (2011). *MOCCA Code for Star Cluster Simulations - II. Comparison with N-body Simulations.* arXiv1112.6246G

<http://www.cosmic-lab.eu/>



NASA, HST

Gromada kulista NGC 6397 sfotografowana Teleskopem Kosmicznym Hubble’a, w której widać grupę niebieskich błękitnych maruderów