

NEWS

**OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 4, Number 314 (2017), 32 – 40

UDC 524.47-54

A.T. Ibraimova

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan
ibraimova@aphi.kz

**LUMINOSITY PROFILES IN NUMERICAL
MODELS OF STAR CLUSTERS**

Abstract. In this work we investigate an actual problem of computational astrophysics - the effect of evolution of density distribution with various-mass stars inside star clusters on the behaviour of observed property of these clusters - their luminosity profiles. The investigation is performed based on numerical models in which stars at initial moment are distributed in phase space according to Plummer distribution, while stellar masses follow bimodal and trimodal laws. Simulation of cluster evolution is performed with direct integration of N-body problem using open-source code based on the Hermite scheme. To analyze the results, we have developed an algorithm of finding luminosity profile given the density distribution of stars, taking into account the dependence of stellar lifetimes on their initial masses. As a result, it was found that for models of the described type, in which the initial quantities of stars of different masses are approximately equal, the luminosity profile peak in general shifts away from the center during star cluster evolution. A physical interpretation of this result is given.

Keywords: stellar dynamics, N-body problem, luminosity profile, mass segregation

УДК 524.47-54

А. Т. Ибраимова

Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

**ПРОФИЛИ СВЕТИМОСТИ В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ
ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ**

Аннотация. В работе изучается актуальная задача вычислительной астрофизики – эффект эволюции распределения звезд разных масс внутри звездных скоплений на изменение наблюдаемой характеристики этих скоплений, а именно их профиль светимости. Исследование проводится на основе численных моделей, в которых звезды в начальный момент распределены в фазовом пространстве согласно модели Пламмера, а распределение по массе является двух- или трехмодальным. Моделирование эволюции производится прямым численным интегрированием задачи многих тел, с использованием открытого кода на основе метода Хермита. Для анализа результатов разработан алгоритм нахождения профиля светимости по заданному распределению плотности скопления, с учетом зависимости времени жизни звезд от их начальной массы. В результате найдено, что для моделей указанного типа, в которых начальное количество звезд разных масс примерно одинаково, пик профиля светимости смещается, в общем случае, в течение эволюции в сторону от центра. Дана физическая интерпретация полученного результата.

Ключевые слова: звездная динамика, задача многих тел, профиль светимости, сегрегация масс.

Введение

Профиль светимости – одна из основных наблюдаемых характеристик звездных скоплений [1]. Однако при проведении численного моделирования звездных скоплений имеют дело в основном с профилями распределения плотности. Вообще говоря, эти два профиля описывают совершенно

разные вещи. Профиль плотности задает распределение массы в трехмерном пространстве, тогда как профиль светимости определяет распределение поверхностной яркости как проекцию на двумерную небесную сферу. В этой работе мы изучим вопрос о связи между этими двумя типами профилей, с учетом различных типов звезд и конечного времени их жизни.

Если модельный кластер состоит из звезд одной и той же массы m , то эволюция профиля светимости будет обусловлена лишь динамической эволюцией самого кластера, по крайней мере в течение времени, равному жизни звезды массы m . Однако в реальных звездных системах звезды имеют различные массы, и в этом случае эволюция профиля светимости будет обусловлена также и другим фактором – временем жизни отдельных популяций звезд. Тяжелые звезды ярче легких, но и время их жизни меньше, поэтому с течением времени профиль светимости будет меняться за счет двух факторов – перераспределения массы и угасанием самых тяжелых (и поэтому самых ярких звезд). В этой работе мы определим, как оба эти фактора, действуя одновременно, влияют на профиль светимости звездных кластеров.

Сегрегация массы в течение эволюции звездных скоплений является не до конца изученным вопросом [2, 3]. Тем не менее, хорошо известно, что в кластерах с неоднородной (в смысле массы) популяцией звезд в течение характерного динамического времени происходит перераспределение массы – самые тяжелые звезды оседают ближе к центру системы, а популяция легких звезд распределяется до больших расстояний (см., например, [4]). Поскольку яркость звезды пропорциональна ее массе, то отсюда следовало бы, что профиль светимости кластеров должен резко возрастать к центру. Однако это имеет место лишь для самых молодых кластеров, в которых большинство звезд еще не закончили свой жизненный цикл. Со временем тяжелые звезды вблизи центра скопления пройдут через фазу сверхновых и оставят после себя остатки в виде черных дыр или нейтронных звезд, имеющих фактически нулевую светимость в оптическом диапазоне. Поэтому и светимость вблизи центра кластера будет со временем падать, несмотря на то, что отношение светимость/масса там изменяется несильно. С другой стороны, во внешних областях кластера находятся в основном легкие и долгоживущие звезды, поэтому светимость в этих областях будет меняться со временем менее выражено.

Численная модель

Обычно в численных экспериментах по эволюции звездных кластеров в качестве начальной функции распределения масс берется распределение Круппы [5], которое достаточно оптимально отражает наблюдаемые распределения звезд по массам во многих реальных скоплениях. Это распределение характеризуется тем, что самых массивных звезд в нем на порядки меньше, чем самых легких. В итоге, в численной модели самых массивных звезд оказывается всего несколько штук, и они почти не играют никакой роли в плане исследования профиля светимости всего скопления. Поэтому мы принимаем более простые распределения звезд – двух- и трехмодальные, т.е. когда вся популяция звезд делится на два или три типа по массе. При этом принимаем, что вклад по количеству звезд от суб-популяций одинаков – иными словами, если распределение двухмодально, то половина звезд имеет одну массу, а другая половина – другую. Аналогично, если распределение трехмодально, то треть звезд имеет одну массу, другая треть – вторую массу, и оставшаяся треть – третью массу. Такое упрощение является оправданным, поскольку за исключением хвоста самых массивных звезд, оно в первом приближении описывает распределение Круппы. Мы также будем варьировать массовый диапазон распределения, т.е. разницу между самыми тяжелыми и самыми легкими звездами.

Для компьютерного моделирования эволюции звездных кластеров мы использовали открытый код `phiGRAPE+GPU` [6]. Расчёты проводились на компьютерном мини-кластере Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова. Кластер снабжен GPGPU-модулями Nvidia Tesla C1060, которые используются кодом `phiGRAPE+GPU` для ускорения просчета гравитационного взаимодействия. Построение и анализ моделей проводились на основе безразмерных систем единиц *N-body units* (NBU), которая разработана специально для применения в области вычислительной астрофизики [7].

В Таблице 1 приведен список использованных в данной работе моделей. Во всех случаях число частиц $N = 16384$. В качестве начального пространственного распределения плотности во

всех моделях использовался сферически-симметричный профиль Пламмера [6]. Модели отличались типом начального распределения звезд по массам и массовым диапазоном, при этом распределение звезд по массам вводилось стохастически, то есть без какой-либо корреляции с положением звезды в кластере. Первая модель с унимодальным распределением – эталонная. Все модели просчитывались до 500 NBU, что для используемого числа частиц соответствует времени, немного большему времени релаксации системы t_{rx} (t_{rx} – характерное время релаксации системы, определяемое числом частиц и временем пересечения частицей всей системы [9]).

Таблица 1 - Исследовавшиеся численные модели

Модель	Тип распределения звезд по массам	Значения масс (NBU)	Массовый диапазон Δm_{\max} , (NBU)
1	Унимодальное	$m = 6.10 \cdot 10^{-5}$	$\Delta m_{\max} = 0$
2	Бимодальное	$m_1 = 5.49 \cdot 10^{-5}, m_2 = 6.71 \cdot 10^{-5}$	$\Delta m_{\max} = 0.1$
3	Бимодальное	$m_1 = 3.05 \cdot 10^{-5}, m_2 = 7.93 \cdot 10^{-5}$	$\Delta m_{\max} = 0.4$
4	Бимодальное	$m_1 = 1.22 \cdot 10^{-5}, m_2 = 9.76 \cdot 10^{-5}$	$\Delta m_{\max} = 0.78$
5	Трехмодальное	$m_1 = 5.49 \cdot 10^{-5}, m_2 = 6.22 \cdot 10^{-5}, m_3 = 6.71 \cdot 10^{-5}$	$\Delta m_{\max} = 0.1$
6	Трехмодальное	$m_1 = 1.22 \cdot 10^{-5}, m_2 = 5.49 \cdot 10^{-5}, m_3 = 9.76 \cdot 10^{-5}$	$\Delta m_{\max} = 0.78$
7	Трехмодальное	$m_1 = 1.03 \cdot 10^{-6}, m_2 = 5.49 \cdot 10^{-5}, m_3 = 5.06 \cdot 10^{-4}$	$\Delta m_{\max} = 0.9$

Для вычисления светимости звезд по их заданным массам мы используем следующие известные феноменологические соотношения [10, 11]:

$$\begin{aligned} \frac{L}{L_{sol}} &= 0.23 \left(\frac{M}{M_{sol}} \right)^{2.3} && \text{при } M < 0.43M_{sol} \\ \frac{L}{L_{sol}} &= \left(\frac{M}{M_{sol}} \right)^4 && \text{при } 0.43M_{sol} < M < 2M_{sol} \\ \frac{L}{L_{sol}} &= 1.5 \left(\frac{M}{M_{sol}} \right)^{3.5} && \text{при } 2M_{sol} < M < 20M_{sol} \\ \frac{L}{L_{sol}} &= 3200 \frac{M}{M_{sol}} && \text{при } M > 20M_{sol} \end{aligned} \quad (1)$$

Для вычисления времени жизни звезды по ее начальной массе мы также используем стандартное соотношение для звезд главной последовательности:

$$\frac{t}{t_{sol}} \sim \left(\frac{M}{M_{sol}} \right)^{-2.5} \quad (2)$$

Построение профиля светимости для модельных звездных скоплений производилось по следующему алгоритму. Сначала находится радиус Лагранжа R_{95} , т.е. тот радиус, внутри которого находится 95% массы всего скопления (100%-ый радиус в таких расчётах не используется,

поскольку несколько звезд, улетевших далеко за пределы системы, могут испортить статистику). Затем пространственное распределение звезд проецируется на заданную плоскость (поскольку мы рассматриваем сферически-симметричные распределения, то, не ограничивая общности, мы проектируем скопление на XY - плоскость). Далее, плоское распределение разбивается в пределах от 0 до R_{95} на заданное количество концентрических колец одинаковой толщины для построения гистограммы светимости (мы использовали 80 интервалов шириной $R_{95}/80$). Внутри каждого кольца производится суммирование светимостей всех звезд, попадающих в это кольцо, в данный момент времени, согласно формулам, приведенным выше. Если для какой-то звезды время жизни меньше текущего момента в модельной эволюции (т.е. вместо этой звезды мы уже имеем нейтронную звезду или черную дыру), то ее светимость принимается равной нулю. Затем суммарная светимость в кольце нормируется на площадь кольца, и строится профиль светимости.

Результаты и обсуждение

На Рис. 1 показано кумулятивное распределение массы во всех семи моделях, на конечный момент модельной эволюции. Как и следовало ожидать, видно, что кластер “раздувается” в течение эволюции тем сильнее, чем больше массовый диапазон в начальном распределении звезд.

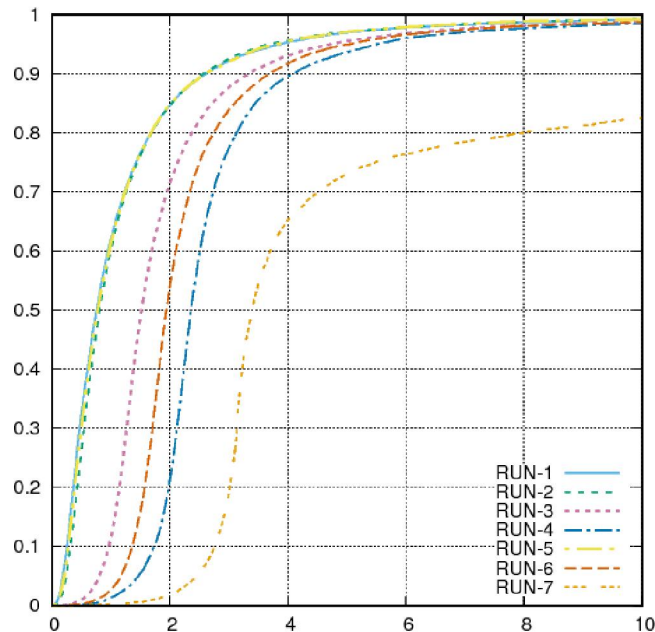


Рисунок 1 – Кумулятивное распределение массы в скоплениях на момент $t = t_{rx}$.
Расстояния (ось абсцисс) и массы (ось ординат) указаны в безразмерных единицах NBU

В Таблице 2 приведены два параметра – 95-процентный радиус Лагранжа R_{95} в начальный момент эволюции, и массовый индекс в конечный момент. Определение R_{95} здесь играет контрольную роль – как видно, его значение в начальный момент почти одинаков для всех моделей. Это свидетельствует о том, что массы звезд действительно не коррелируют с их положением в системе в заданных начальных условиях. Вторым параметром – т.н. массовый индекс, просчитанный на конечный момент эволюции. Этим параметром мы определили отношение массы системы, которая вышла за первоначальное значение R_{95} , ко всей массе системы. Этот параметр определяет сразу два эффекта – насколько изменились размеры скопления в течение эволюции, и до какой степени произошла сегрегация масс внутри нее.

Для удобства в Таблице 2 приведены также массовые диапазоны из Таблицы 1 – видно, что существует корреляция между конечным массовым индексом и начальным массовым диапазоном.

Таблица 2 - Параметры численных моделей

Модель	1	2	3	4	5	6	7
$R_{95} (t = 0)$	3.085	3.089	3.098	3.127	3.080	3.121	3.005
Массовый индекс при $t = t_{end}$	0.075	0.070	0.115	0.201	0.076	0.147	0.807
Массовый диапазон	0	0.1	0.4	0.78	0.1	0.78	0.9

Для более детального исследования сегрегации массы внутри скоплений, с учетом вклада от различных популяций звезд, мы построили дифференциальные распределения масс (гистограммы), на конечный момент эволюции, при этом были построены распределения отдельно по массовым компонентам (рис. 2). В частности, видно, что пик массы для всех компонент сдвигается от центра тем сильнее, чем больше массовый диапазон модели, при этом пики для различных компонент фактически не сдвигаются друг относительно друга. На последнем рисунке в нижнем ряду необходимо учесть масштаб расстояния – в результате большого массового диапазона, многие звезды вылетели на расстояния, на порядок большее начального размера системы.

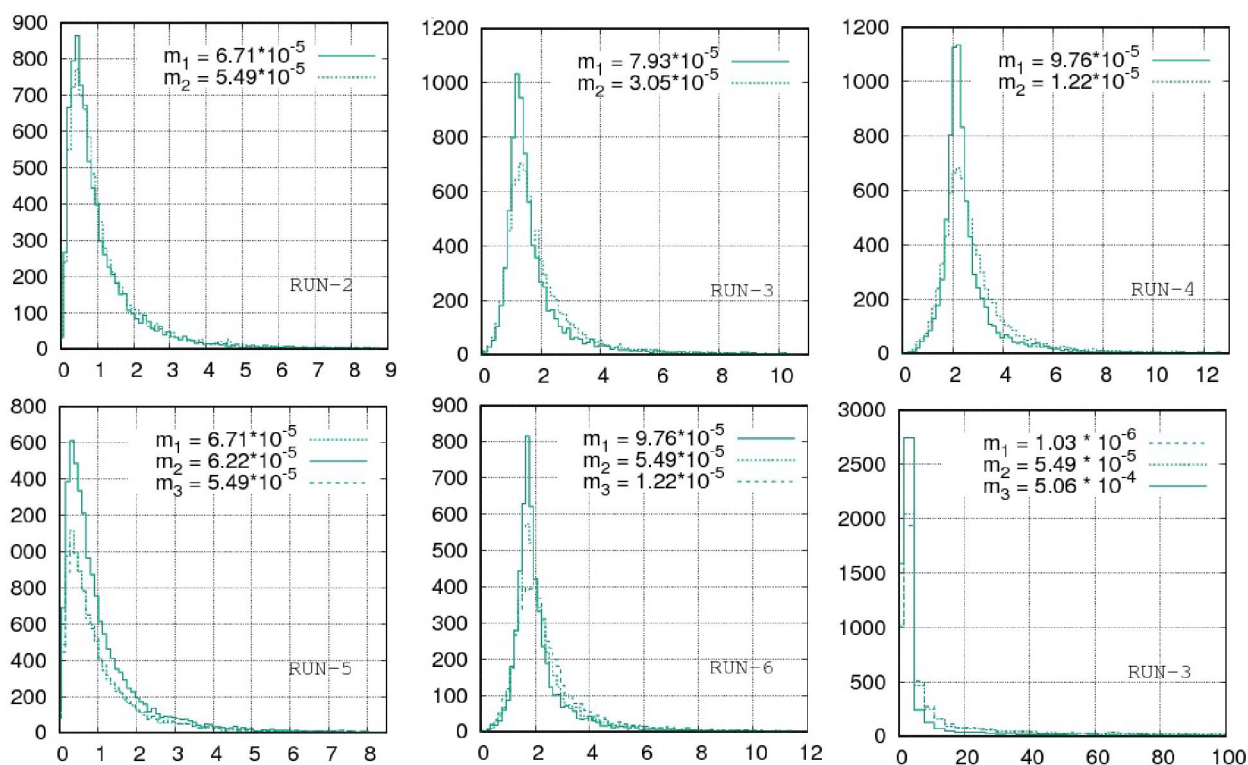


Рисунок 2 – дифференциальное распределение масс для моделей 2-7, на конечный момент эволюции. Ось абсцисс – расстояние от центра системы (в единицах NBU), по оси ординат – масса (в единицах NBU). Для каждой модели распределение показано отдельно для массовых компонент. Верхний ряд – модели с бимодальным распределением масс, нижний ряд – модели с трехмодальным распределением

Еще более подробную информацию об эволюции структуры скопления можно получить с помощью отображения радиусов Лагранжа. На Рис. 3 мы изобразили радиусы Лагранжа для следующих значений масс: 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75% и 95%. Каждая кривая показывает эволюцию радиуса сферы, содержащей указанное количество массы (в процентах от общей массы скопления). Расположение моделей на рисунке такое же, как на Рис. 2. Видно, что четко наблюдается корреляция между массовым диапазоном и ростом внутренних радиусов Лагранжа. Например, в моделях 2 и 5 с наименьшим массовым диапазоном внутренние радиусы практически

не изменяются со временем, то есть массовая структура скопления не эволюционирует в областях до 75% массы. Напротив, в моделях 4 и 7 с максимальными массовыми диапазонами происходит заметное увеличение даже 1%-го радиуса Лагранжа.

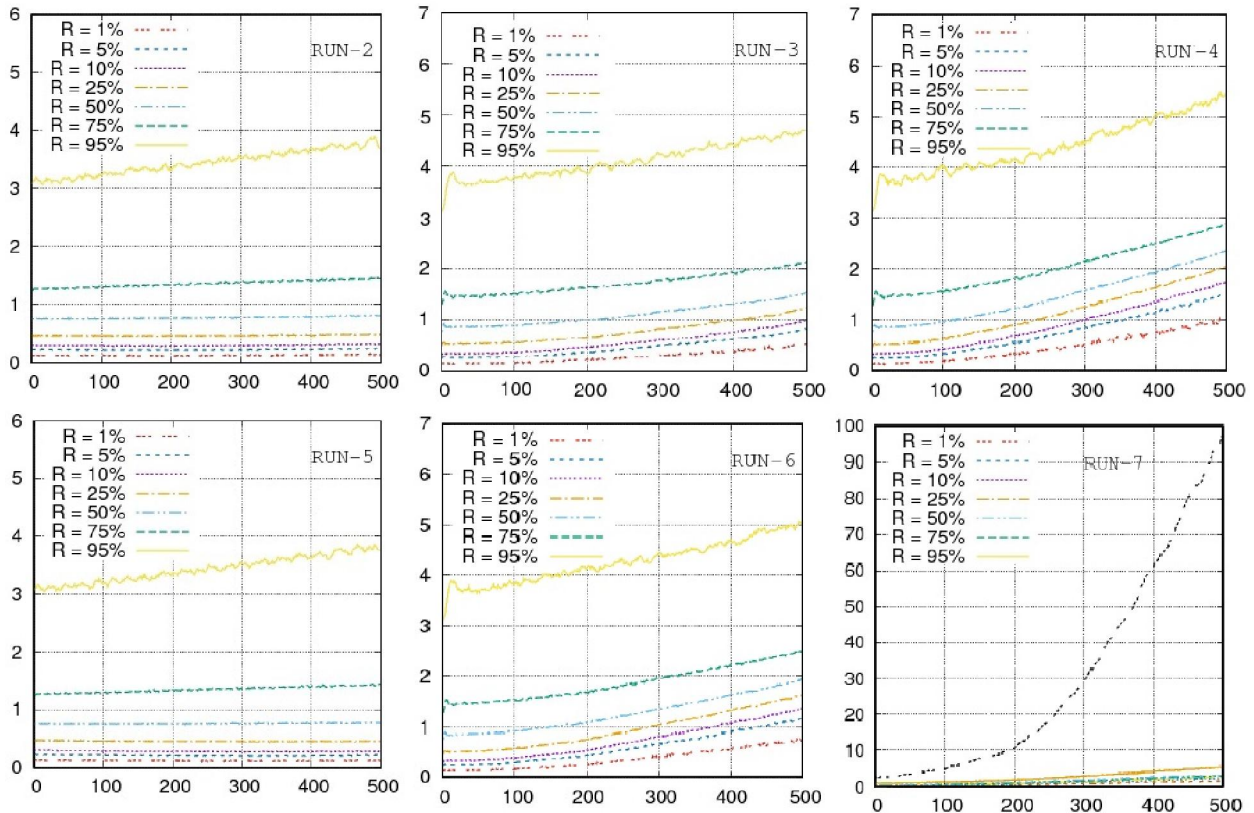


Рисунок 3 – эволюция лагранжевских радиусов в численных моделях. Ось абсцисс – время (в единицах NBU), ось ординат – радиус сферы (в единицах NBU), содержащий указанный процент массы

Теперь обратимся к вопросу о том, как вышеописанная эволюция массовой структуры скоплений сказывается на их наблюдаемой характеристике – профиле светимости. Для этого применяем алгоритм, описанный в конце предыдущего раздела. При этом заметим, что, в силу использования безразмерной NBU-системы единиц, мы можем оценить профиль светимости для каждой модели (кроме модели 1 с унимодальным распределением) в двух вариантах. В первом варианте – с прямой иерархией масс – принимается, что самая легкая масса в модели соответствует массе Солнца. В другом варианте – с инвертированной иерархией масс – принимаем, что самые тяжелые звезды в модели соответствуют массе Солнца. Зафиксировав таким образом одну из масс, в обоих случаях остальные массы определяются автоматически. Поэтому, имея 6 численных моделей, можно получить 12 профилей светимости.

В качестве эталонного профиля светимости на Рис. 4 показан случай модели 1, в которой все массы одинаковы. Как видно, в этом случае профиль светимости практически не изменился за все модельное время эволюции. (Конечно, даже если бы существовали реальные скопления с изначально одинаковыми звездами, то профиль светимости в них рано или поздно изменился бы радикальным образом, поскольку время жизни звезд конечно. В данном случае мы принимаем, что все звезды имеют массу Солнца, что соответствует времени жизни звезды в ~ 10 млрд лет. Это намного больше масштаба времени релаксации рассматриваемых моделей.)

Модельные профили светимости, аналогичные изображенному на Рис. 4, показаны для моделей 2-7 с прямой иерархией масс на Рис. 5, а с инвертированной иерархией – на Рис. 6. На всех указанных гистограммах количество интервалов составляет 80.

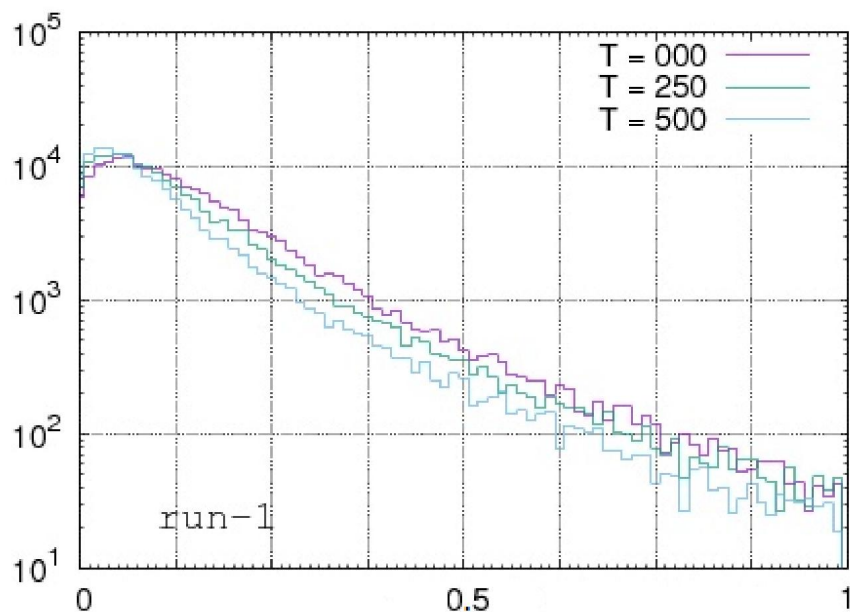


Рисунок 4 – Профиль светимости для модели 1 в три момента – начало, середина ($T = 250 NBU$) и конец ($T = 500 NBU$) модельной эволюции. Ось абсцисс – расстояние от центра системы в единицах текущего значения R_{95} , ось ординат – светимость (в единицах светимости Солнца), нормированная на площадь.

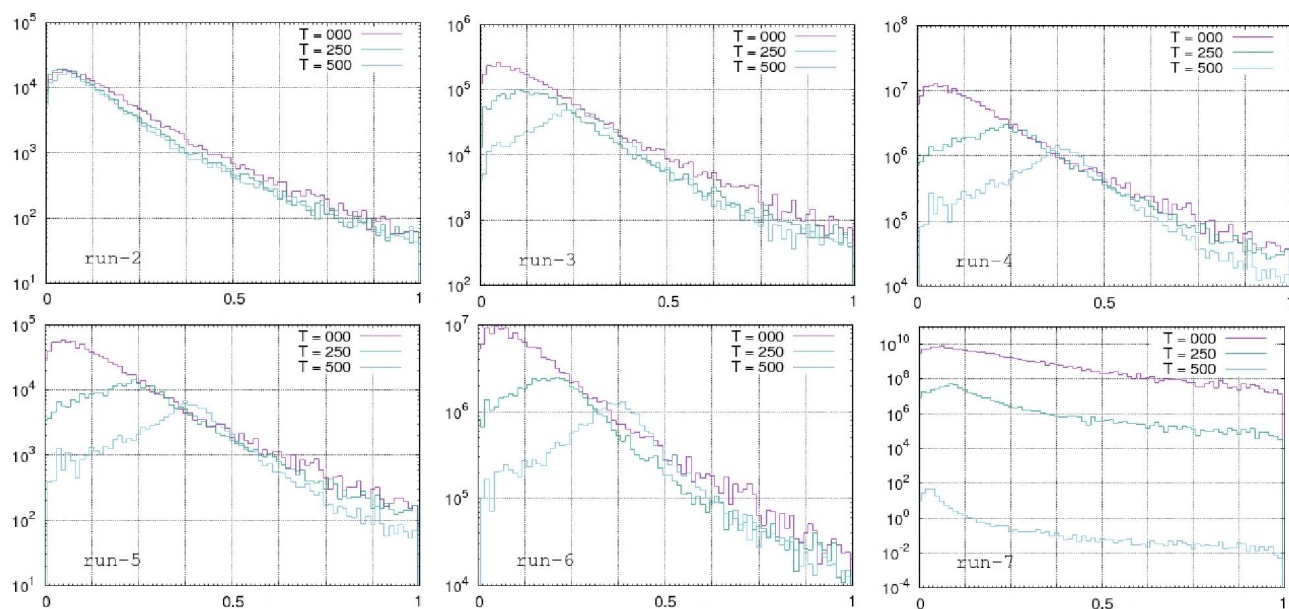


Рисунок 5 – Профили светимости для моделей 2-7 с прямой иерархией масс. Обозначения и системы единиц те же, что и на Рис. 4

Как можно сразу же заметить, отличие между формами соответствующих кривых на рисунках 5 и 6 малы – профили отличаются фактически только абсолютным значением, при этом светимость выше в случаях с прямой иерархией масс. Заметное исключение составляет модель 7, с тремя типами масс и большим массовым диапазоном. Для этой модели большое отличие видно и для формы конечного профиля – в случае прямой иерархии пик профиля сильно упал к концу модельной эволюции, тогда как для случая инвертированной иерархии пик снизился незначительно. Это обусловлено тем, что в случае инвертированной иерархии большинство звезд имеют массу меньше массы Солнца и, соответственно, живут дольше. Для прямой иерархии –

наоборот, большинство звезд имеют массу больше массы Солнца, живут меньше, и, как следствие, к концу модельной эволюции самые тяжелые звезды уже превратились в черные дыры и нейтронные звезды. Это и привело к общему опусканию профиля светимости.

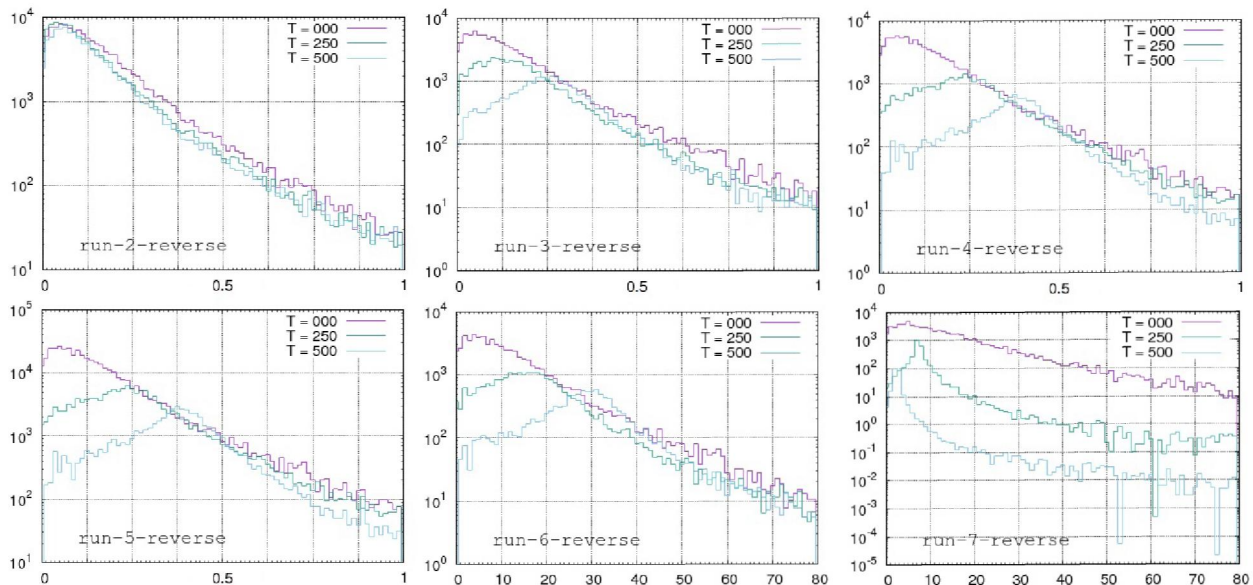


Рисунок 6 – Профили светимости для моделей 2-7 с инвертированной иерархией масс. Обозначения и системы единиц те же, что и на Рис. 4

Другая нетипичная характеристика модели 7 (как с прямой, так и с инвертированной иерархией масс) – пик профиля светимости сначала удаляется от центра, а затем возвращается к нему в течение эволюции, тогда как в других моделях пик удаляется от центра монотонно. Дальнейшее подробное исследование этой модели объяснило этот факт особой комбинацией распределения популяций звезд с минимальной и средней массой.

Интересным результатом оказалось также и то, что эволюция профиля светимости зависит не только от начального диапазона масс, но и количества типов масс внутри этого диапазона. Из Рис. 5 и 6 видно, что эволюция профиля светимости в моделях 2 и 5 отличается коренным образом, несмотря на то, что массовый диапазон в этих моделях одинаков.

Заключение

В целом, из полученных результатов можно сделать следующие выводы. Во-первых, мы разработали (в первом приближении) алгоритм, позволяющий по текущему распределению звезд внутри модельного звездного скопления получить наблюдаемую характеристику этого скопления в виде профиля светимости, что важно с точки зрения сопоставления численных и наблюдательных результатов. Для этого необходимо для конкретных случаев соответственным образом согласовывать системы единиц, поскольку, например, для наблюдаемых профилей светимости расстояние по оси абсцисс будет выражено в угловых единицах. Во-вторых, для скоплений, заданных по модели Пламмера и имеющих простые двух- и трехмодальные распределения звезд по массе, мы получили, что в общем случае пик профиля светимости смещается в течение эволюции от центра скопления. Такой результат подтверждается и простыми физическими соображениями. Тяжелые звезды в результате действия динамического трения на фоне легких звезд оседают к центру, передавая кинетическую энергию легким звездам, которые, в свою очередь, распределяются по расстоянию дальше от центра. В то же время, тяжелые звезды живут меньше легких, поэтому с течением эволюции светимость в центральной области падает. С другой стороны, менее массивные звезды продолжают светить, но они распределены по большему объему и потому дают небольшой вклад в светимость. В результате, для распределений, имеющих достаточно большой массовый диапазон с примерно равными количествами звезд разной массы, профиль светимости со временем опускается как в центре, так и на периферии, что может сделать скопления, рожденные с указанными начальными условиями, трудно наблюдаемыми.

Работа выполнена в рамках проекта № 0073-10/ПЦФ-15-МОН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bastian N., Schweizer, F., Goudfrooij P., Larsen S. S., Kissler-Patig M. Luminosity profiles and sizes of massive star clusters in NGC 7252. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 431(2), 2013. P. 1252-1263
- [2] Küpper A. H. W. et al. "Mass segregation and fractal substructure in young massive clusters - I. The McLuster code and method calibration". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 417(3), 2011. P. 2300-2317.
- [3] Krumholz M. R. "The Big Problems in Star Formation: the Star Formation Rate, Stellar Clustering, and the Initial Mass Function". *Physics Reports*, Vol. 539, P. 49-134.
- [4] Parker R.J., Goodwin, S.P., Wright N.J., Meyer M.R., Quanz S.P. Mass segregation in star clusters is not energy equipartition. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Vol. 459, 2016. P. L119-L123
- [5] Kroupa P. On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 322, 2001. 231p.
- [6] Harfst S., Gualandris A., Merritt D., Spurzem R., Portegies Zwart S.F., Berczik P. Performance analysis of direct N-body algorithms on special-purpose supercomputers. *New Astronomy*, Vol. 12, 2007. P. 357-377
- [7] Aarseth S.J. Gravitational N-body Simulations: Tools and Algorithms. *Cambridge University Press*, Cambridge. 2003.
- [8] Plummer H.C. On the problem of distribution in globular star clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 71, 1911. P. 460-470
- [9] Binney J., Tremaine S. *Galactic Dynamics*. Princeton University Press, Princeton. 2008.
- [10] Duric N. *Advanced astrophysics*. Cambridge University Press, 2004. 19 p.
- [11] Salaris M., Cassisi S., *Evolution of stars and stellar populations*. John Wiley & Sons. 2005. P. 138-140.

REFERENCES

- [1] Bastian N., Schweizer, F., Goudfrooij P., Larsen S. S., Kissler-Patig M. Luminosity profiles and sizes of massive star clusters in NGC 7252. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 431(2), 2013. P. 1252-1263
- [2] Küpper A. H. W. et al. "Mass segregation and fractal substructure in young massive clusters - I. The McLuster code and method calibration". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 417(3), 2011. P. 2300-2317.
- [3] Krumholz M. R. "The Big Problems in Star Formation: the Star Formation Rate, Stellar Clustering, and the Initial Mass Function". *Physics Reports*, Vol. 539, P. 49-134.
- [4] Parker R.J., Goodwin, S.P., Wright N.J., Meyer M.R., Quanz S.P. Mass segregation in star clusters is not energy equipartition. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Vol. 459, 2016. P. L119-L123
- [5] Kroupa P. On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 322, 2001. 231p.
- [6] Harfst S., Gualandris A., Merritt D., Spurzem R., Portegies Zwart S.F., Berczik P. Performance analysis of direct N-body algorithms on special-purpose supercomputers. *New Astronomy*, Vol. 12, 2007. P. 357-377
- [7] Aarseth S.J. Gravitational N-body Simulations: Tools and Algorithms. *Cambridge University Press*, Cambridge. 2003.
- [8] Plummer H.C. On the problem of distribution in globular star clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 71, 1911. P. 460-470
- [9] Binney J., Tremaine S. *Galactic Dynamics*. Princeton University Press, Princeton. 2008.
- [10] Duric N. *Advanced astrophysics*. Cambridge University Press, 2004. 19 p.
- [11] Salaris M., Cassisi S., *Evolution of stars and stellar populations*. John Wiley & Sons. 2005. P. 138-140.

ӨОЖ: 524.47-54

А.Т. Ибраимова

В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы қ., Қазақстан

**ЖҰЛДЫЗДЫ ШОҒЫРЛАРДЫҢ САНДЫҚ ҮЛГІЛЕРІНДЕГІ
ЖАРҚЫРАҒЫШТЫЛЫҚ КЕСКІНІ**

Аннотация. Аталған жұмыста есептеуіш астрофизиканың өзекті мәселесі – жұлдызды шоғырлардағы әртүрлі массадағы жұлдыздар таралу эволюциясының осы шоғырлардың бақыланатын сипаттамаларының, яғни олардың жарқырағыштық кескіні өзгерісіне әсері зерттелген. Зерттеу сандық үлгілеу негізінде жүргізілді, атап айтсақ, Пламмер үлгісіне сәйкес жұлдыздар бастапқы мезетте фазалық кеңістікте таралған, ал масса таралуы екі немесе үш модальды болып табылады. Эволюцияны үлгілеу Хермит әдісіне негізделген ашық кодты пайдалана отырып көп дене есебін тікелей сандық интегралдау арқылы жүзеге асырылады. Нәтижелерді талдау үшін шоғырдың берілген таралу тығыздығы бойынша жарқырағыштылық кескінін табу үшін жұлдыздардың бастапқы массаларының өмір сүру уақытына тәуелділігін еске ала отырып алгоритм жасалды. Нәтижесінде аталған типтегі үлгілер үшін, яғни массалары әртүрлі жұлдыздар саны шамамен бірдей, жалпы айтқанда, жарқырағыштылық кескін шыңы эволюция барысында ортасынан шетке қарай жылжиды. Алынған нәтижеге физикалық түсіндірме берілген.

Түйін сөздер: жұлдызды динамика, көп денелер есебі, жарқырағыштылық кескіні, массаларды сегрега-циялау.