

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Чулков Дмитрий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИИ
ВИЗУАЛЬНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЁЗД**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

Научный руководитель: Малков Олег Юрьевич

Доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: Бобылев Вадим Вадимович

Доктор физико-математических наук,

заведующий лабораторией динамики Галактики ГАО РАН

Дамбис Андрей Карлович

Доктор физико-математических наук,

заведующий отделом астрометрии и службы времени

ГАИШ МГУ

Селезнев Антон Федорович

Доктор физико-математических наук,

профессор кафедры астрономии, геодезии, экологии и

мониторинга окружающей среды УрФУ, старший научный

сотрудник Коуровской астрономической обсерватории

Защита состоится 26 октября 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: chulkov@physics.msu.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/593171956>.

Автореферат разослан 18 сентября 2023 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.1,

доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Масса — ключевой параметр, преимущественно определяющий последующую эволюцию и наблюдаемые характеристики звезды. Начальная функция масс (НФМ) обусловлена комплексным процессом звездообразования, и её определение является важным для многих областей астрономии. НФМ нельзя установить напрямую, требуется применение косвенных методов [1]. Универсальность НФМ и её зависимость от локальных условий среды остаётся открытым вопросом [2–4]. Кратность звёздного населения тесно связана с НФМ [5]. С одной стороны, двойные звёзды могут рассматриваться как помеха, мешающая точному определению НФМ. В то же время двойные системы обладают большим числом параметров и несут в себе дополнительную информацию о звездообразовании и последующей эволюции по сравнению с одиночными звёздами. Создание теоретической модели, способной в полной мере воспроизвести наблюдаемые свойства звёздного населения, в том числе касающиеся двойных и кратных звёзд, — амбициозная задача, которую ещё предстоит решить [6; 7].

Вопрос о разнообразии свойств кратного звёздного населения также остаётся открытым [8; 9]. Звёзды поля представляют собой совокупность объектов различного возраста, сформировавшихся при разных условиях. Имеются указания на то, что двойные звёзды в близлежащих областях звездообразования и рассеянных скоплениях по своим характеристикам существенно отличаются от звёзд поля [10; 11]. Результаты численного моделирования показывают, что динамическое взаимодействие в скоплениях и ассоциациях оказывает существенное влияние на двойные с характерным размером орбиты $a > 10^2$ астрономических единиц (а.е.) [12; 13]. Вместе с тем в широком диапазоне параметров первоначальные характеристики звёздного населения, заложенные на этапе формирования, сохраняются [14]. Особенно примечательно отношение масс компонентов $q = M_2/M_1$, так как, вероятно, форма распределения $f(q)$ слабо подвержена динамической эволюции и напрямую отражает результат процесса звездообразования [15]. Распределение $f(q)$ может рассматриваться как индикатор взаимного влияния компонентов двойной звезды. Ожидается, что независимое формирование компонентов приводит к крутому убывающему распределению $f(q)$ с большим числом высококонтрастных пар ($q \rightarrow 0$). В то же время взаимодействие звёзд, перенос массы или конкурирующая аккреция в диске вокруг двойной звезды должна уравнивать массы ($q \rightarrow 1$) [16]. Данный

фактор также должен приводить к зависимости $f(q)$ от размера орбиты, так как взаимодействие звёзд ожидается более интенсивным в тесных парах.

Нынешняя орбита двойной звезды может не отражать условий, имевших место на этапе её формирования. Гравитационный коллапс протозвёздного облака с последующей турбулентной фрагментацией и быстрой миграцией образовавшихся сгустков ближе к центру, по-видимому, отвечает за формирование систем с характерным размером орбиты в диапазоне 10^2 — 10^4 а.е [17], который является типичным для исследуемых визуальных двойных. Образование компонентов благодаря процессам гравитационной неустойчивости в околозвёздном диске отвечает за формирование более тесных систем [18]. Важную роль в образовании наиболее широких двойных, обладающих низкой энергией связи, по-видимому, играет распад звёздных скоплений [19; 20]. Другим возможным механизмом формирования широких пар является динамическая эволюция в тройной системе, приводящая к выталкиванию компонента на далёкую эллиптическую орбиту [21], и взаимодействие соседних протозвёздных облаков [22].

Двойные звёзды составляют обширный класс объектов, проявляющий себя в разных диапазонах электромагнитного спектра и за его пределами [23]. Разделённые двойные системы преимущественно наблюдаются в оптическом диапазоне как спектроскопические, затменные, визуальные двойные или как пары с общим собственным движением. Создание обширной выборки, сохраняющей основные статистические свойства звёздного населения, — нетривиальная задача [24]. Необходима грамотная интерпретация данных и тщательный учёт эффектов селекции [25]. Исследуемые в литературе наблюдательные ансамбли зачастую сравнительно малы, что приводит к большим неопределённостям и противоречивым выводам, полученным на основе их изучения.

По наблюдениям кратной звезды Кастор (α Близнецов), проведённым в 1759 — 1803 годах, удалось установить, что изменение взаимного положения звёзд не может быть объяснено простым сочетанием собственных движений [26]. Напротив, Кастор вместе со своим спутником движутся вокруг общего центра тяжести. Сегодня такие объекты классифицируются как визуальные двойные звёзды. Для непосредственного определения орбиты необходим достаточно длинный ряд наблюдений с измерением трёх параметров: времени наблюдения, позиционного угла и углового расстояния между компонентами. Впервые задача была аналитически решена почти два столетия тому на-

зад [27]. Определяемые элементы орбиты включают в себя период P и большую полуось a'' , измеряемую в угловой мере. Параллакс ϖ требуется для перехода к линейной шкале: $a \sim a''/\varpi$. Далее с помощью третьего закона Кеплера $M_d \sim \frac{a^3}{P^2} \sim \frac{a''^3}{\varpi^3 P^2}$ возможно вычислить общую массу системы. Ввиду орбитальных периодов, измеряемых десятилетиями и столетиями, и недостатка надёжно определённых параллаксов, применение данного метода для измерения звёздных масс оставалось весьма ограниченным. При том что ещё в первой половине XIX века было известно свыше 2,5 тысяч визуальных двойных [28], к 1918 году оценки орбитальных элементов имелись лишь для 112 объектов, а массы были вычислены лишь для 14 из них [29]. Космическая миссия *Hipparcos* [30] позволила определить надёжные параллаксы для сотен визуальных двойных с известными орбитами, тем не менее, вплоть до настоящего времени основным источником точных звёздных масс оставались системы, одновременно наблюдаемые как затменные и спектроскопические двойные [31–33].

Космический проект *Gaia* [34] существенно расширил объём доступной информации. В рамках третьего выпуска данных DR3 [35] доступны свыше 169 тысяч астрометрических решений для неодионых светил [36]. Вместе с тем они по прежнему составляют малую долю от общего числа двойных. Отметим, что орбитальные периоды 99% систем, обладающих специализированным решением для двойных звёзд в *Gaia* DR3, лежат в диапазоне 0,28 — 1500 суток [37], так что новые данные практически не пересекаются в пространстве параметров с объектами, ставшими предметом настоящего исследования. Отметим, что *Gaia* DR3 фактически является дополнением к ранее вышедшему каталогу *Gaia* EDR3 [38], астрометрическое содержание основной таблицы, включая параллаксы, является идентичным. Таким образом, хотя исследование, касающееся визуальных двойных с известными орбитами, построено на данных *Gaia* EDR3, оно остаётся полностью актуальным и после выхода DR3.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является изучение визуальных двойных звёзд и их важного подтипа — визуальных двойных звёзд с известными орбитами. Первоначальные задачи можно кратко сформулировать так:

- Исследование методом популяционного синтеза визуальных двойных звёзд с целью установить ограничения на фундаментальные параметры звёздного населения, прежде всего на начальную функцию масс.

- Снабжение параллаксами известных визуальных двойных звёзд с известными орбитами и последующая оценка их масс.

Уже в процессе работы были сформированы дополнительные задачи:

- Апробация заявленных погрешностей параллаксов *Gaia* EDR3.
- Получение соотношения масса — светимость звёзд главной последовательности для фотометрической системы *Gaia*.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работе задач были использованы общенаучные методы (анализ, дедукция, индукция). Результаты анализировались с помощью авторского программного обеспечения.

Научная новизна

Указанные результаты получены и опубликованы автором впервые.

- Получение ограничений на начальную функцию масс, распределение отношения масс компонентов и размера орбиты при анализе всенебесной выборки двойных звёзд поля с учётом пространственного распределения с помощью созданной модели популяционного синтеза.
- Исчерпывающее снабжение параллаксами и расчёт масс визуальных двойных звёзд с известными орбитами.
- Независимая апробация заявленных погрешностей параллаксов *Gaia* EDR3 с помощью визуальных двойных звёзд с известными орбитами.
- Вывод соотношения масса — светимость в фотометрической полосе *Gaia* для звёзд главной последовательности.

Научная и практическая значимость

Определение начальной функции масс и статистических закономерностей параметров двойных звёзд необходимо для широкого круга астрономических исследований, включающего в себя изучения процессов звездообразования, астрофизику высоких энергий, внегалактическую астрономию и космологию. Полученные результаты могут применяться в указанных областях.

Данные астрометрической миссии *Gaia* широко востребованы в современной астрономии. Автором получен ряд результатов, полезных для интерпретации данных: оценка недоучёта заявленных погрешностей параллаксов, методика поиска далёких третьих компонентов для дополнительного обогаще-

ния параллаксами и определение соотношения масса — светимость в фотометрической полосе *Gaia*. Оценки масс исследованных двойных звёзд опубликованы в международной базе данных VizieR и доступны для дальнейшего анализа.

Положения, выносимые на защиту

1. Случайное объединение звёзд в пары не является алгоритмом образования визуальных двойных систем поля. Начальная функция масс более массивного компонента системы описывается степенным распределением $f(M_1) \sim M_1^{-\alpha}$ с $\alpha = 2,8 \pm 0,2$ для звёзд $1m_{\odot} < M_1 < 5m_{\odot}$. Распределение отношения масс компонентов $f(q = M_2/M_1)$ не подчиняется монотонной степенной функции и содержит избыток числа систем с компонентами близкой массы ($q > 0,95$).
2. Установлены параллаксы 3350 систем из каталога орбит визуальных двойных звёзд с привлечением данных *Gaia* EDR3 и других каталогов. Разработанная методика поиска далёких компонентов, использующая априорную информацию о собственном движении звёзд и расстоянии, позволяет определить параллакс для 548 систем, причём в 196 случаях решение *Gaia* EDR3 для непосредственных компонентов двойной системы не содержит параллакс.
3. Для 17 гравитационно-связанных двойных звёзд различие номинальных параллаксов компонентов в *Gaia* EDR3 превышает 8 стандартных ошибок. Коэффициент поправки, характеризующий недоучёт заявленной погрешности параллакса, зависит от нормированной единицы взвешенной ошибки (RUWE). 16 систем, известных в литературе как визуальные двойные звёзды с известными орбитами, являются оптическими двойными и не связаны гравитационно.
4. Для 326 систем из каталога визуальных двойных звёзд с известными орбитами оценки массы, полученные с помощью третьего закона Кеплера и синтетического соотношения масса — светимость в фотометрической полосе *G Gaia* EDR3 для объектов главной последовательности, согласуются в пределах 20%.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- (i) Chulkov Dmitry, Malkov Oleg. Visual binary stars with known orbits in Gaia EDR3. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V. 517, Is. 2, p.2925-2941, 2022. Импакт-фактор WoS (2022): 4,8.
- (ii) Chulkov Dmitry. Pairing function of visual binary stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V. 501, Is. 1, p.769-783, 2021. Импакт-фактор WoS (2022): 4,8.
- (iii) Docobo Jose, Tamazian Vakhtang, Malkov Oleg, Campo Pedro, Chulkov Dmitry. Improved orbits and parallaxes for eight visual binaries with unrealistic previous masses using the Hipparcos parallax. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V.459, Is.2, p. 1580-1585, 2016. Импакт-фактор WoS (2022): 4,8.
- (iv) Malkov Oleg, Tamazian Vakhtang, Docobo Jose, Chulkov Dmitry. Dynamical masses of a selected sample of orbital binaries. Astronomy & Astrophysics, V. 546, id. A69, pp. 5, 2012. Импакт-фактор WoS (2020): 6.5.

Иная публикация (v) Чулков Д. А. Визуальные двойные звезды с известными орбитами в Gaia DR3. Физика космоса: труды 50-й Международной студенческой научной конференции. Издательство Уральского университета, 2023, с. 586. ISBN 978-5-7996-3700-2.

Личный вклад автора Работа ii и v опубликована соискателем самостоятельно без соавторов. В статьях i, iii и iv автор участвовал в подготовке публикации, анализе и обсуждении полученных результатов совместно с соавторами. При этом в работе i вклад соискателя определяющий и составляет не менее 85%. В работах iii и iv автор анализировал выборку визуальных двойных с известными орбитами и параллаксами *Hipparcos*, личный вклад соискателя не менее 20%.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обосновывается использованием современных астрометрических и астрофизических данных и хорошо разработанных методов статистического анализа. Созданная модель популяционного синтеза при применении к одиночным звёздам даёт результаты, хорошо согласующиеся с современными оценками в литературе.

Апробация работы

1. Конференция молодых учёных ИНАСАН, устный доклад, онлайн. Pairing function of visual binary stars. 05.11.2020.
2. Ежегодный симпозиум европейского астрономического общества, постер, онлайн. Visual binaries with known orbits in Gaia eDR3. 28.06-02.07.2021.

3. Ежегодный симпозиум европейского астрономического общества, постер, онлайн. IMF of the resolved stellar binary population in the solar neighbourhood. 28.06-02.07.2021
4. Всероссийская астрономическая конференция, устный доклад, онлайн. Визуальные двойные звёзды с известными орбитами в Gaia eDR3. 23.08.2021
5. Всероссийская астрономическая конференция, устный доклад, онлайн. Определение закона распределения двойных звёзд по массам и разделению компонентов 26.08.2021.
6. Конференция современная звёздная астрономия, устный доклад, КГО ГАИШ МГУ. Визуальные двойные звёзды с известными орбитами в каталоге Gaia EDR3. 09.11.2022.
7. Конференция молодых учёных ИНАСАН, устный доклад. Visual binary stars with known orbits in Gaia EDR3. 15.11.2022
8. Семинар по обзору статей на arXiv, ГАИШ МГУ, устный доклад, онлайн. Visual binary stars with known orbits in Gaia EDR3, 28.12.2022
9. Астрофизический семинар ИНАСАН, устный доклад. Исследование популяции двойных звёзд, 12.01.2023
10. Новое в понимании эволюции двойных звезд, устный доклад на семинаре, УрФУ. Визуальные двойные звезды с известными орбитами в Gaia DR3. 04.02.2023
11. Ежегодный симпозиум европейского астрономического общества, постер, онлайн. Visual binary stars with known orbits in Gaia EDR3. 10-14.07.2023

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 109 страниц с 26 рисунками и 16 таблицами. Список литературы содержит 148 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Описаны цели и задачи исследования, дается характеристика научной новизны работы, а также научной и практической значимости полученных результатов. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора, приведен список опубликованных статей, а также конференций, на которых были представлены эти результаты. Изложена структура и новизна работы, а также краткое содержание диссертации.

В Главе 1 с помощью метода популяционного синтеза исследован наблюдательный ансамбль визуальных двойных звёзд. После анализа эффектов селекции создана всенебесная выборка, включающая 1227 систем из каталога WDS [39]. Ограничения наложены на угловое расстояние, блеск компонентов и его разность: $0,8 < \rho'' < 15$, $\text{mag}_{1,2} < 9$, $\Delta\text{mag} < 3$. Данные обогащены параллаксами из каталогов *Gaia* DR2 и *Hipparcos*. В рамках популяционного синтеза взятые за основу фундаментальные параметры (масса, возраст, металличность звёзд, размер орбиты) трансформируются в наблюдаемые (видимые звёздные величины и угловое расстояние между компонентами) с помощью плотной сетки изохрон PARSEC [40]. Исследуются различные алгоритмы присвоения масс компонентам двойных. Полученные синтетические распределения сравниваются с наблюдаемыми с помощью статистических критериев согласия Колмогорова — Смирнова и Андерсона — Дарлингга. Модель проверяется и калибруется с помощью выборки одиночных звёзд, в распределении $f(M) \sim M^{-\alpha}$ выбрано оптимальное значение показателя НФМ $\alpha = 2,6$ для $M > M_{\odot}$, хотя указанное значение зависит от принятой априорно истории звездообразования.

Отмечено, что предпочтительная функция распределения проекции расстояния между компонентами практически не зависит от предположений о НФМ, отдано предпочтение $\epsilon = 1,2$ в $f(s) \sim s^{-\epsilon}$ в диапазоне $100 < s < 2000$ а.е. Изучены четыре сценария присвоения масс двойным звёздам. Случайное формирование пар уверенно отвергается, так как генерирует недостаточно систем с малой разностью блеска компонентов. Добавление отдельной популяции звёзд-близнецов позволяет достичь согласия с наблюдаемым распределением при $\alpha = 2 \pm 0,2$ и доле близнецов $f_t = 0,04 \pm 0,015$, но подразумевают частоту встречаемости двойных, близкую к 100 %, что выглядит нереалистичным.

Далее опробованы алгоритмы, использующие в качестве опорных параметров массу главного компонента или суммарную массу двойной системы в сочетании с отношением масс звёзд $q = M_2/M_1$. При использовании монотонной степенной функции $f(q)$ в качестве плотности вероятности итоговое распределение разности яркости компонентов статистически отвергается. Соответствия удаётся достичь при добавлении небольшой доли звёзд-близнецов (рисунок 1). При этих сценариях оптимальный наклон НФМ $\alpha = 2,8 \pm 0,2$ не зависит от выбора $f(q)$. Выбор единственного наилучшего набора параметров не выглядит обоснованным, комбинации приемлемых значений наклона β в

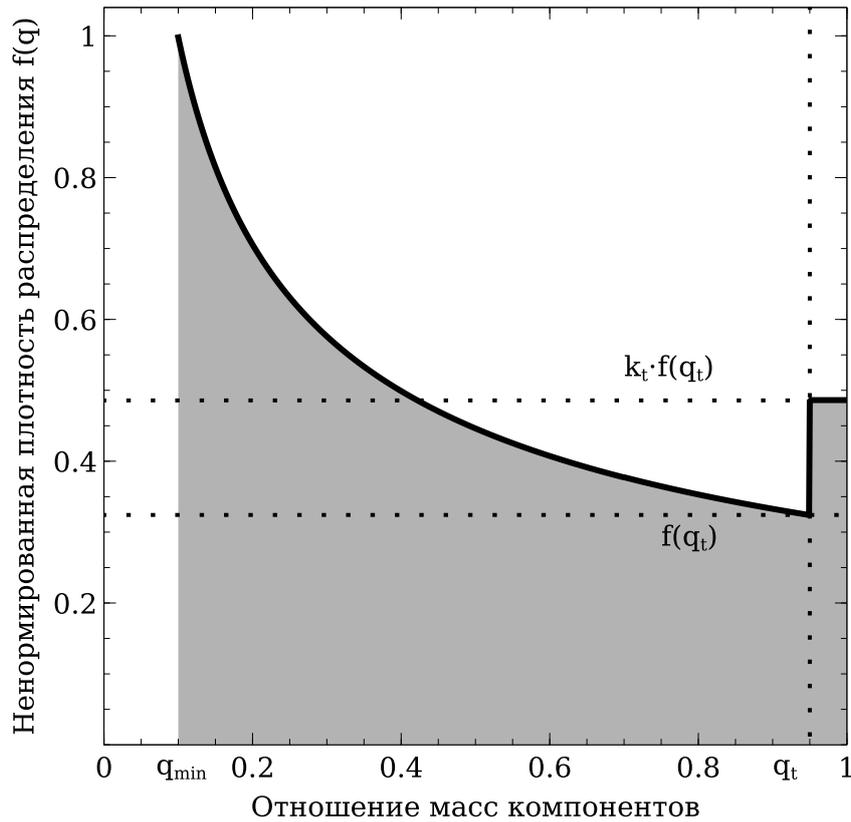


Рис. 1 — Функция распределения отношения масс компонентов $f(q = M_2/M_1)$ с избытком звёзд-близнецов. $f(q) \sim q^\beta$ для $q_{\min} \leq q < q_t$, $q_t = 0,95$. При построении использованы значения: $\beta = -0,5$; $k_t = 1,5$.

степенном распределении $f(q)$ и доли звёзд-близнецов f_t показаны на рисунке 2. Допустимые значения формируют две параллельные полосы на диаграмме, при использовании суммарной массы в качестве фундаментальной (сценарий SCP) наклон β должен быть больше на $\Delta\beta \sim 0,7$ по сравнению с алгоритмом с фундаментальной массой более яркого компонента (PCP). В сценарии PCP оптимальный показатель $f(q)$ составляет $\beta \sim -1$ при малом избытке близнецов $f_t \sim 0,01$. Доля звёзд-близнецов может быть выше, в таком случае требуется более крутое распределение $f(q) \sim q^{-1,5}$ и высокая частота встречаемости двойных, что делает сценарии с большим f_t неправдоподобными.

Модель популяционного синтеза успешно воспроизводит наблюдаемые распределения блеска $\text{mag}_1, \text{mag}_2$, Δmag и углового расстояния ρ согласно статистическим критериям согласия. Квартили распределения расстояния, полученные с помощью параллаксов, также показывают приемлемое согласие. Для генерации синтетического населения используется широкий диапазон масс, возрастов и металличностей, вместе с тем в конечную выборку, ограниченную с учётом эффектов селекции, попадают объекты из небольшого пространства па-

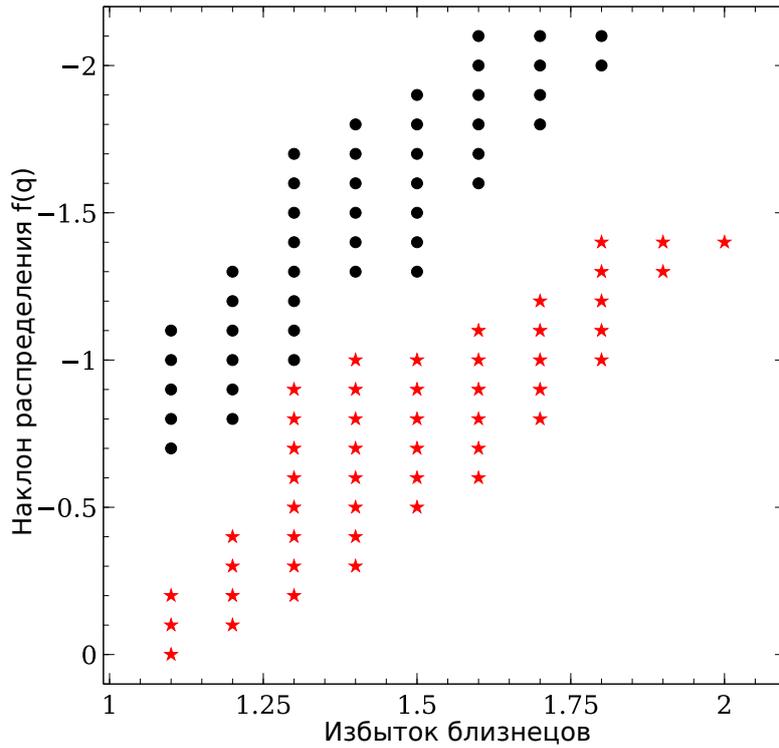


Рис. 2 — Значения показателя β распределения $f(q)$ и избытка звезд-близнецов k_t , приводящие к удовлетворительному согласию (p -значение выше 0,1 для статистических критериев Колмогорова — Смирнова и Андерсона — Дарлинга) распределений mag_1 , mag_2 , Δmag , ρ в сценариях RCP (закрашенные круги) и SCP (звёздочки) для наблюдательной и синтетической выборки. Выбор единственного наилучшего набора параметров выглядит неоправданным, в сценарии SCP оптимальное значение больше на $\Delta\beta \sim 0,7$. Модели с большой долей близнецов k_t требуют высокую плотность и частоту встречаемости двойных звёзд, эти характеристики плохо известны.

раметров. Основные характеристики синтетической выборки мало отличаются среди статистически приемлемых сценариев. В частности, 80 % масс главных компонентов сосредоточены в пределах $1 — 4,5m_\odot$, расстояния между звёздами лежат в диапазоне 90 — 2000 а.е. Лишь 10% систем имеют $q < 0,65$. Выводы об оптимальных алгоритмах и распределениях параметров актуальны в указанном диапазоне, модель слабо чувствительна к изменениям за его пределами.

Полученные результаты неплохо согласуются с работами [16] и [41], указанные исследования предполагали изменение $f(q)$ в зависимости от расстояния между компонентами или орбитального периода, тогда как использованная нами модель применяет общий закон $f(q)$ во всём диапазоне размера орбит и тем не менее успешно воспроизводит наблюдаемые распределения. На-

стоящее исследование, в отличие от указанных выше, не использует ограничение по параллаксам, а значит свободно от сопутствующих эффектов селекции.

В **Главе 2** по итогам исследования визуальных двойных звёзд с известными орбитами из каталога ORB6 проведён анализ погрешностей параллаксов *Gaia* EDR3 и выполнена оценка массы систем двумя способами. В первую очередь проведено отождествление и исследована зависимость типа решения в *Gaia* в зависимости от параметров двойной звезды. Показано, что 2/3 решений *Gaia* EDR3 для систем с разделением компонентов $0,2 < \rho'' < 0,5$ являются 2-параметрическими и не содержат параллакс ϖ . 521 разделённая пара с параллаксами, известными для обоих компонентов, исследуется детальнее. Среди них выявлено 16 вероятных оптических пар. Большое различие измеренных параллаксов компонентов, иногда достигающее $\Delta\varpi/\sigma \sim 18$, не всегда означает, что двойная является случайной проекцией. В частности, показано что 17 систем являются гравитационно-связанными несмотря на $\Delta\varpi/\sigma > 8$. Дальнейший анализ погрешностей показал, что размер номинальных ошибок недооценён в три раза для источников с параметром RUWE, превышающим $\chi > 2$.

Проведён поиск далёких компонентов для дополнительного снабжения выборки параллаксами *Gaia* EDR3 с учётом собственного движения звёзд и известных априорно расстояний *Hipparcos*. Параллакс третьего света особенно полезен для двойных с 2-параметрическим решением, но в отдельных случаях он позволяет уточнить или опровергнуть параллакс непосредственных компонентов двойной. Каталоги *Gaia* DR2, TGAS и *Hipparcos* привлечены для определения параллаксов всех звёзд ORB6. Динамические массы двойных вычисляются с помощью третьего закона Кеплера. С помощью набора изохрон PARSEC [40] и эволюционных треков MIST [42] выведено синтетическое соотношение масса — светимость для фотометрической полосы G , которое затем используется для оценки фотометрической массы. Массы вычисляются для всех доступных значений параллаксов. Для разрешённых двойных выбирается значение ϖ , позволяющее добиться наилучшего согласия динамической и фотометрической массы. Всего для 326 систем оценки масс укладываются в пределах 20%, согласие лучше для наиболее надёжных орбит. Полный набор данных с параллаксами и оценками масс доступен в Vizier: [J/MNRAS/517/2925](https://vizier.cfa.harvard.edu/vizier/?outfmt=html&source=J/MNRAS/517/2925).

Заключение. Визуальные двойные звёзды на протяжении столетий являются объектом изучения астрономов. В первой главе диссертации проведена

параметризация наблюдательного ансамбля с помощью модели популяционно-го синтеза. Результатом стало получение ограничений на начальную функцию масс звёзд, являющуюся основополагающим и широко востребованным законом звёздной астрономии. Обстоятельно исследовано распределение отношения масс компонентов и проверена гипотеза о преимущественном формировании звёзд- близнецов. Во второй главе уже сами двойные системы стали инструментом, позволившим независимо оценить качество опубликованных параллаксов миссии *Gaia*. Полученные оценки масс для звёзд с известными орбитами позволили выделить системы с надёжно определенными параметрами и установить объекты, для которых потребуется пересмотр имеющихся данных.

Рост объёма доступной информации с выходом новых версий каталога *Gaia* становится вызовом для исследователей и подчёркивает необходимость корректного учёта эффектов наблюдательной селекции. Интерпретация результатов *Gaia* в отрыве от иных наблюдательных данных рискует породить ложные артефакты. Перспективным направлением для продолжения работы выглядит комбинирование данных *Gaia* с ранее проведёнными исследованиями и их использование в качестве целеуказания для новых наблюдений. Распределение двойных звёзд по разности блеска и отношению масс компонентов остаётся плохо определённым и его уточнение потребует проведение качественной многоцветной фотометрии тесных двойных. В этой связи сохраняется потенциал применения и развития методов спекл-интерферометрии в Специальной Астрофизической Обсерватории РАН и Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ. Многообещающим является исследование двойных в ограниченных популяциях — звёздных скоплениях и потоках, среди объектов с аномальной металличностью и кинематикой. Широкий диапазон нерешённых вопросов оставляет уверенность в том, что двойные звёзды ещё долго будут оставаться поставщиками новых открытий в астрономии.

*Посвящается памяти лектора Московского планетария
Станислава Васильевича Широкова (1932 — 2010).*

Список литературы

1. *Kroupa Pavel, Weidner Carsten, Pflamm-Altenburg Jan et al.* The Stellar and Sub-Stellar Initial Mass Function of Simple and Composite Populations // Planets, Stars and Stellar Systems. — 2013. — Vol. 5. — P. 115.
2. *Bastian N., Covey K. R., Meyer M. R.* A Universal Stellar Initial Mass Function? A Critical Look at Variations // ARA&A. — 2010. — Vol. 48. — P. 339–389.
3. *Krumholz Mark R.* The big problems in star formation: The star formation rate, stellar clustering, and the initial mass function // Phys. Rep. — 2014. — Vol. 539. — P. 49–134.
4. *Offner S. S. R., Clark P. C., Hennebelle P. et al.* The Origin and Universality of the Stellar Initial Mass Function // Protostars and Planets VI / ed. by Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, Thomas Henning. — 2014. — P. 53.
5. *Kroupa Pavel, Jerabkova Tereza.* The Impact of Binaries on the Stellar Initial Mass Function // arXiv e-prints. — 2018. — P. arXiv:1806.10605.
6. *Goodwin S. P., Kroupa P., Goodman A., Burkert A.* The Fragmentation of Cores and the Initial Binary Population // Protostars and Planets V / ed. by Bo Reipurth, David Jewitt, Klaus Keil. — 2007. — P. 133.
7. *Lee Yueh-Ning, Offner Stella S. R., Hennebelle Patrick et al.* The Origin of the Stellar Mass Distribution and Multiplicity // Space Sci. Rev. — 2020. — Vol. 216, № 4. — P. 70.
8. *King R. R., Goodwin S. P., Parker R. J., Patience J.* Testing the universality of star formation - II. Comparing separation distributions of nearby star-forming regions and the field // MNRAS. — 2012. — Vol. 427, № 3. — P. 2636–2646.
9. *Marks Michael, Leigh Nathan, Giersz Mirek et al.* Revisiting the universality of (multiple) star formation in present-day star formation regions // MNRAS. — 2014. — Vol. 441, № 4. — P. 3503–3512.

10. *Duchêne G., Lacour S., Moraux E. et al.* Is stellar multiplicity universal? Tight stellar binaries in the Orion nebula Cluster // MNRAS. — 2018. — Vol. 478, № 2. — P. 1825–1836.
11. *Deacon N. R., Kraus A. L.* Wide binaries are rare in open clusters // MNRAS. — 2020. — Vol. 496, № 4. — P. 5176–5200.
12. *Parker Richard J., Goodwin Simon P., Kroupa Pavel, Kouwenhoven M. B. N.* Do binaries in clusters form in the same way as in the field? // MNRAS. — 2009. — Vol. 397, № 3. — P. 1577–1586.
13. *Dorval J., Boily C. M., Moraux E., Roos O.* Wide- and contact-binary formation in substructured young stellar clusters // MNRAS. — 2017. — Vol. 465, № 2. — P. 2198–2211.
14. *Parker Richard J., Meyer Michael R.* Binaries in the field: fossils of the star formation process? // MNRAS. — 2014. — Vol. 442, № 4. — P. 3722–3736.
15. *Parker Richard J., Reggiani Maddalena M.* The binary companion mass ratio distribution: an imprint of the star formation process? // MNRAS. — 2013. — Vol. 432, № 3. — P. 2378–2384.
16. *Moe Maxwell, Di Stefano Rosanne.* Mind Your Ps and Qs: The Interrelation between Period (P) and Mass-ratio (Q) Distributions of Binary Stars // ApJS. — 2017. — Vol. 230, № 2. — P. 15.
17. *Lee Aaron T., Offner Stella S. R., Kratter Kaitlin M. et al.* The Formation and Evolution of Wide-orbit Stellar Multiples In Magnetized Clouds // ApJ. — 2019. — Vol. 887, № 2. — P. 232.
18. *Kratter Kaitlin, Lodato Giuseppe.* Gravitational Instabilities in Circumstellar Disks // ARA&A. — 2016. — Vol. 54. — P. 271–311.
19. *Kouwenhoven M. B. N., Goodwin S. P., Parker Richard J. et al.* The formation of very wide binaries during the star cluster dissolution phase // MNRAS. — 2010. — Vol. 404, № 4. — P. 1835–1848.
20. *Moeckel Nickolas, Clarke Cathie J.* The formation of permanent soft binaries in dispersing clusters // MNRAS. — 2011. — Vol. 415, № 2. — P. 1179–1187.

21. *Reipurth Bo, Mikkola Seppo*. Formation of the widest binary stars from dynamical unfolding of triple systems // *Nature*. — 2012. — Vol. 492, № 7428. — P. 221–224.
22. *Tokovinin Andrei*. Formation of wide binary stars from adjacent cores // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 468, № 3. — P. 3461–3467.
23. *Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al.* Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // *ApJl*. — 2017. — Vol. 848, № 2. — P. L12.
24. *Duchêne Gaspard, Kraus Adam*. Stellar Multiplicity // *ARA&A*. — 2013. — Vol. 51, № 1. — P. 269–310.
25. *Tout C. A.* On the relation between the mass-ratio distribution in binary stars and the mass function for single stars. // *MNRAS*. — 1991. — Vol. 250. — P. 701–706.
26. *Herschel William*. Account of the Changes That Have Happened, during the Last Twenty-Five Years, in the Relative Situation of Double-Stars; With an Investigation of the Cause to Which They Are Owing // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*. — 1803. — Vol. 93. — P. 339–382.
27. *Savary Felix*. Mémoire sur les orbites des étoiles doubles and Sur la détermination des orbites que décrivent autour de leur centre de gravité deux étoiles très rapprochées l'une de l'autre. — Bureau des longitudes, 1827. — P. 56–69.
28. *Struve F. G. W.* Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae per magnum Fraunhoferi tubum annis a 1824 ad 1837 in Specula Dorpatensi institutae... — 1837.
29. *Aitken Robert Grant*. The binary stars. — 1918.
30. *Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J. et al.* The Hipparcos Catalogue. // *A&A*. — 1997. — Vol. 500. — P. 501–504.
31. *Popper D. M.* Stellar masses. // *ARA&A*. — 1980. — Vol. 18. — P. 115–164.
32. *Torres G., Andersen J., Giménez A.* Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications // *A&Ar*. — 2010. — Vol. 18, № 1-2. — P. 67–126.

33. *Serenelli Aldo, Weiss Achim, Aerts Conny et al.* Weighing stars from birth to death: mass determination methods across the HRD // *A&Ar.* — 2021. — Vol. 29, № 1. — P. 4.
34. *Gaia Collaboration.* The Gaia mission // *A&A.* — 2016. — Vol. 595. — P. A1.
35. *Gaia Collaboration.* Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties // arXiv e-prints. — 2022. — P. arXiv:2208.00211.
36. *Halbwachs Jean-Louis, Pourbaix Dimitri, Arenou Frédéric et al.* Gaia Data Release 3. Astrometric binary star processing // arXiv e-prints. — 2022. — P. arXiv:2206.05726.
37. *Gaia Collaboration.* Gaia Data Release 3: Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure // arXiv e-prints. — 2022. — P. arXiv:2206.05595.
38. *Gaia Collaboration.* Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // *A&A.* — 2021. — Vol. 649. — P. A1.
39. *Mason Brian D., Wycoff Gary L., Hartkopf William I. et al.* The 2001 US Naval Observatory Double Star CD-ROM. I. The Washington Double Star Catalog // *AJ.* — 2001. — Vol. 122. — P. 3466–3471.
40. *Bressan Alessandro, Marigo Paola, Girardi Léo. et al.* PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code // *MNRAS.* — 2012. — Vol. 427, № 1. — P. 127–145.
41. *El-Badry Kareem, Rix Hans-Walter, Tian Haijun et al.* Discovery of an equal-mass ‘twin’ binary population reaching 1000 + au separations // *MNRAS.* — 2019. — Vol. 489, № 4. — P. 5822–5857.
42. *Choi J., Dotter A., Conroy C. et al.* Mesa Isochrones and Stellar Tracks (MIST). I. Solar-scaled Models // *ApJ.* — 2016. — Vol. 823, № 2. — P. 102.