

УДК 524.38/524.4

ПОПУЛЯЦИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД С ОБЩИМ СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ В GAIA DR2

© 2020 г. С. А. Сапожников^{1,*}, Д. А. Ковалева¹, О. Ю. Малков¹, А. Ю. Сытов¹

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: thestriks@gmail.com

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 30.05.2020 г.

Принята к публикации 30.05.2020 г.

Описывается создание однородного каталога звезд с общим собственным движением на основании Gaia DR2. Был составлен предварительный список всех пар звезд в радиусе 100 пк от Солнца с разделением не более парсека, и в нем выделено подмножество содвижущихся пар — широких двойных звезд. Из рассмотрения исключены скопления и системы кратностью больше 2. Результирующий каталог насчитывает 10 358 пар звезд. Функция селективности каталога оценена с помощью сопоставления с набором случайно сопоставляемых звезд поля, и с модельной выборкой, полученной методом популяционного синтеза. Оценка масс звезд для пар каталога, оба компонента которых принадлежат главной последовательности, показывает избыток пар “близнецов” из звезд со сходными массами. Этот избыток уменьшается с увеличением разделения между компонентами. Показано, что подобный эффект не может быть следствием только функции селективности и не появляется в модели, не отдающей предпочтение формированию звезд схожих масс искусственно. Статья основана на докладе, сделанном на конференции “Астрометрия вчера, сегодня, завтра” (ГАИШ МГУ, 14–16 октября 2019 г.).

DOI: 10.31857/S0004629920100096

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительная доля звездного населения сосредоточена в двойных звездах. Согласно некоторым оценкам [1], половина всех звезд главной последовательности входят в состав двойных и кратных систем. Популяция двойных звезд — важная составляющая звездного населения Галактики, оказывающая влияние на эволюцию звездной системы в целом. Кроме того, параметры звездных пар могут дать нам важную информацию о процессах звездообразования.

Принято считать, что звезды рождаются большими группами, которые со временем распадаются на отдельные системы. Абсолютное большинство двойных и кратных звезд — остатки таких групп. Это означает, что, исследуя кратную систему, мы имеем основания предполагать, что эти две звезды сформировались одновременно, при одинаковых условиях [2]. Исследование звездных систем с различными характеристиками позволяет продвинуться в решении многих астрофизических вопросов (см., напр., обсуждение в работе [3]). Сама динамическая связь между компонентами пар дает возможность прямыми методами оценивать некоторые физические параметры этих компонентов. Взаимодействие же между тесными компонентами приводит к образованию

различных привлекательных для изучения астрономических объектов: новых, сверхновых типа Ia, пульсаров, симбиотических двойных звезд.

В настоящей работе мы рассматриваем популяцию широких двойных звезд. Под этим названием мы будем понимать пары, расстояние между компонентами которых достаточно велико, чтобы их эволюция протекала так же, как у одиночных звезд. Среди таких двойных есть как пары с наблюдаемым орбитальным движением, так и пары с общим собственным движением (содвижущиеся) с орбитальными периодами от нескольких тысяч до миллионов лет и с расстоянием между компонентами до многих тысяч астрономических единиц [4]. Широкие двойные связаны слабо, и могут быть легко разрушены неоднородностями потенциала Галактики, например, из-за близкого прохождения гигантских молекулярных облаков. Это делает такие системы ценными индикаторами динамического окружения Галактики. Распределение широких двойных звезд по массам компонентов и по расстоянию между ними позволяет выяснять особенности процессов звездообразования.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств популяции широких двойных и содвижущихся звезд в пределах до 100 пк от Солнца, выде-

ленной при исследовании каталога кандидатов в пары с общим собственным движением [5], созданного на базе данных Gaia DR2.

В разделе 2 кратко изложены принципы создания каталога и его очистки, в разделе 3 мы исследуем и обсуждаем параметры выделенной популяции двойных звезд с общим собственным движением. В разделе 4 сформулированы выводы.

2. КАТАЛОГ ДВОЙНЫХ И СОДВИЖУЩИХСЯ ЗВЕЗД

Список кандидатов в двойные звезды был выбран из объектов каталога Gaia DR2, имеющих значение параллакса $10 \leq \varpi \leq 100$ mas (mas — milli arc second, миллисекунда дуги), что соответствует, при оценке расстояния до звезды по параллаксу $\frac{1000}{\varpi_{\text{мсд}}}$ [пк], звездам, расположенным в объеме шарового слоя с внутренним радиусом 10 пк и внешним радиусом 100 пк вокруг Солнца. Нижняя граница расстояния до Солнца обусловлена вычислительными ограничениями, связанными с тем, как происходит отбор компонентов в двойные (см. Приложение). Верхнее ограничение на расстояние (100 пк) выбрано по ряду следующих причин. В этом объеме характерная относительная ошибка параллакса не превышает 10%, что, собственно, и позволяет для оценки расстояний пользоваться значением параллакса как указано выше (см., напр., [6, 7]). Кроме того, каталог Gaia DR2 со стороны слабых звезд полон до $G \approx 17^m$ [8], что означает, что в пределах 100 пк он включает все звезды нижней части главной последовательности, по крайней мере, до спектрального подкласса M4.5 (такие звезды, согласно данным Мамажека¹ имеют абсолютную звездную величину $G \approx 12^m$), а в пределах видимости Gaia (до видимой величины $G \approx 21^m$) находятся все карлики до спектрального подкласса M10.

В качестве потенциальных кандидатов в компоненты двойных рассматриваются не все источники Gaia в этой области, а только удовлетворяющие ограничениям на качество астрометрического и фотометрического решения (см. [9], а также Gaia DR2 Known Issues², и статью по Gaia DR2 astrometry³).

Ограничения на качество астрометрического решения следующие: во-первых, параметр RUWE (Renormalized Unit Weight Error) не превышает

¹ http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM\dwarf_UBVI_JHK_colors_Teff.txt

² <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2-known-issues>

³ https://www.cosmos.esa.int/documents/29201/1770596/Lindgren_GaiaDR2_Astrometry_extended.pdf/1ebddb25-f010-6437-cb14-0e360e2d9ff09

1.4, и, во-вторых, номинальная относительная ошибка параллакса не может быть более 10%. Качество фотометрического решения проверяется ограничением на т.н. “фактор избытка потока” (Flux Excess Factor [9]). Введение указанных ограничений отфильтровывает множество слабых источников, сосредоточенных, в основном, в направлении центра галактики с плотностью, сильно превышающей ожидаемую, исходя из представления о распределении звезд в Галактике. Мы предполагаем, что эти источники могут быть более далекими звездами, для которых из-за фона неба и большой плотности источников в плоскости галактики надежность определения параллакса низка.

Описанным критериям удовлетворяют 40% источников Gaia в радиусе 100 пк. Эти 242 122 источника трактуются как те звезды, среди которых мы производим поиск двойных и содвигущихся звезд.

Чтобы рассмотреть вопрос о том, является ли каждая конкретная пара звезд двойной системой, нужно попарно сопоставить их параметры. Делать это для разных параметров для всех возможных пар в ансамбле крайне непрактично, поэтому составляется предварительный список возможных парных комбинаций звезд, расположенных друг к другу ближе 1 пк (в определении положения звезды в трехмерном пространстве фигурирует расстояние от Солнца, определенное как $d[\text{пк}] = \frac{1000}{\varpi[\text{мсд}]}$). Для оптимизации составления

такого списка, слишком затратного по времени при простом решении задачи, реализуется алгоритм, подробно описанный в Приложении.

Мы полностью удаляем из нашего списка области неба, соответствующие известному рассеянному скоплению Гиады, а также движущейся группе (по другим сведениям, скоплению) Мамажек 1, поскольку в этих областях не представляется возможным разделить двойные звезды и содвигущиеся члены. Для пар из результирующего списка (39 445 пар) были рассчитаны параметры относительного движения — разность собственных движений $\Delta\mu$, проекция относительного движения (в единицах линейной скорости) $dV = |d|\Delta\mu$. На рис. 1 показано, как в ансамбле пар звезд, расстояние между которыми $d \leq 1$ пк, выделяется подмножество звездных пар со сходным собственным движением компонентов. Более того, при учете расстояния между компонентами становится заметно, как ансамбль разделяется на два подмножества и по физическому разделению: пары с большой разностью собственных движений преимущественно более широки, а с малой — более тесны (см. рис. 2).

Мы трактуем это как разделение на “случайные совпадения” и содвигущиеся/двойные

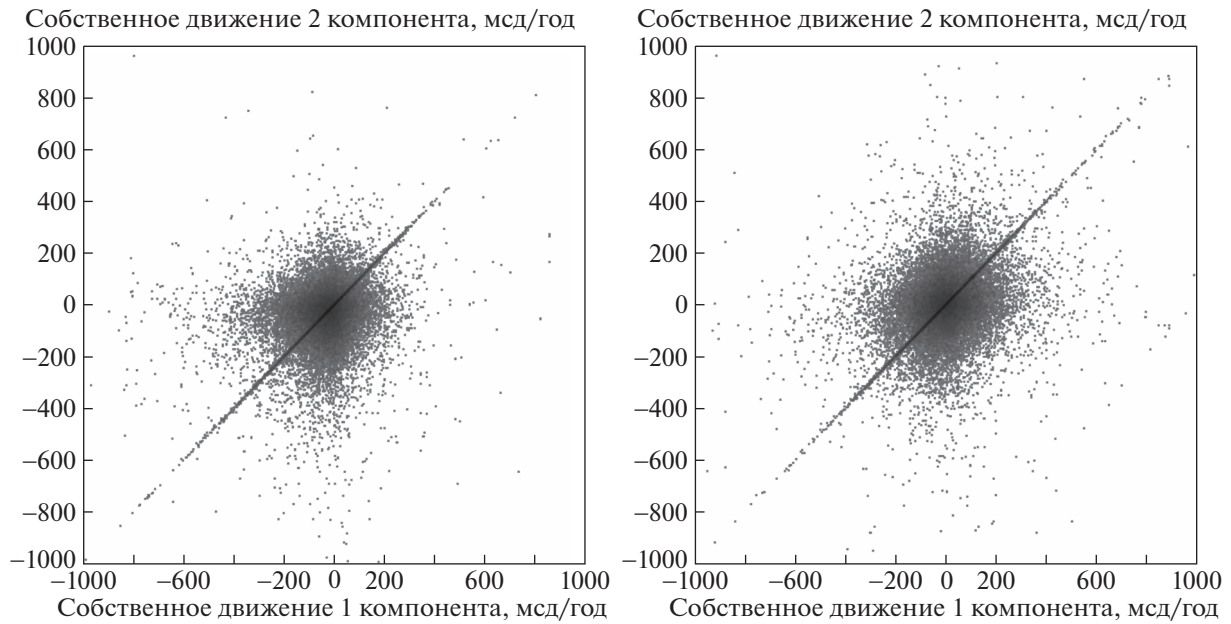


Рис. 1. Распределение компонентов пар по собственному движению по склонению (слева) и прямому восхождению (справа). Положение отдельных точек по двум осям показывает собственное движение двух компонентов. Видна значительно более населенная диагональ, соответствующая парам с общим собственным движением.

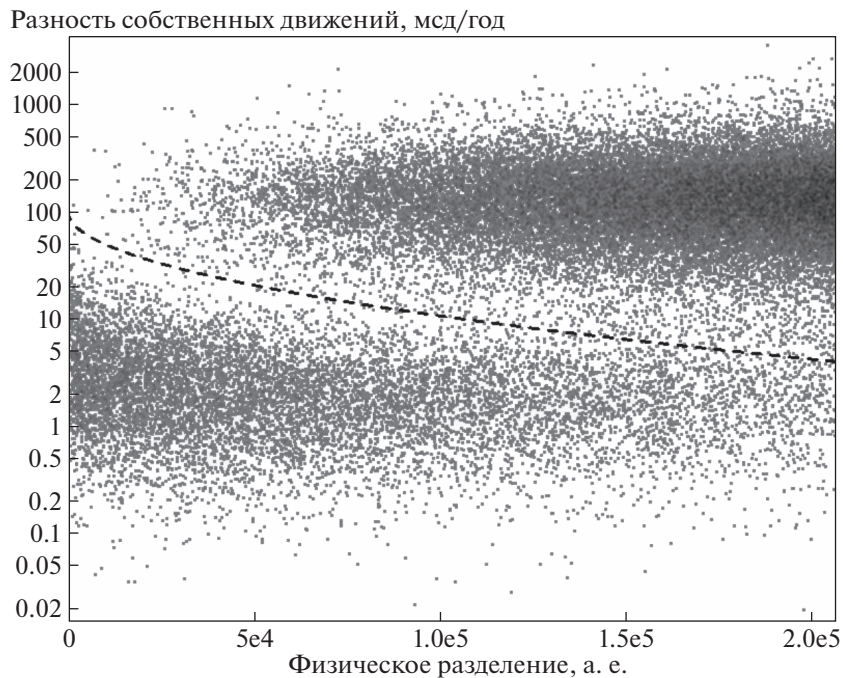


Рис. 2. Распределение звездных пар по диаграмме “физическое разделение–разность собственных движений”. Звездные пары разделяются на две группы, критерий для формального разделения между ними указан штриховой линией на рисунке.

звездные пары, и вводим эмпирический критерий, связывающий физическое разделение и разность собственных движений: $\lg(\Delta\mu) < 2 - 1.4\sqrt{S}$.

Здесь S – физическое разделение в парсеках. Пары, удовлетворяющие этому критерию, мы включаем в наш каталог и считаем кандидатами в

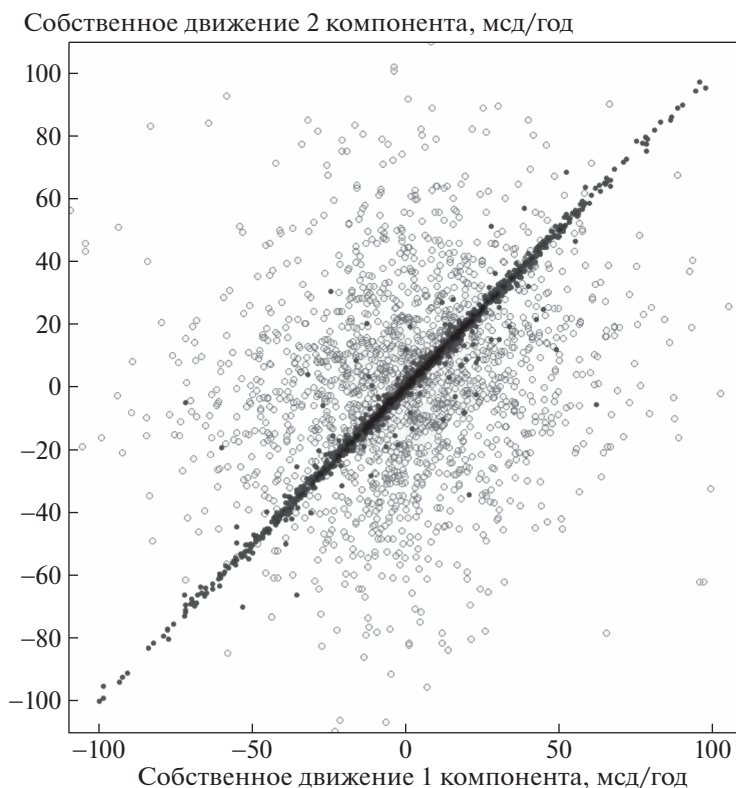


Рис. 3. Распределение по лучевой скорости компонентов звездных пар. Удовлетворяющие нашему условию на собственные движения и физическое разделение показаны жирными точками, а не удовлетворяющие – незаполненными.

двойные системы, имеющими связанную природу (либо гравитационно связанные широкие двойные звезды, либо члены содвигущихся групп). Независимым образом примененный критерий может быть оценен путем сравнения лучевых скоростей для пар звезд, в которых для обоих компонентов они известны. Таких пар всего в списке 3591 (9%); из них предложенному эмпирическому критерию удовлетворяют 1636.

Построим для лучевых скоростей диаграмму, аналогичную рис. 1 для собственных движений, она показана на рис. 3. Видно, что лучевые скорости компонентов пар, удовлетворяющих выбранному критерию, выделяются высокой степенью согласия. Среди 46 пар, удовлетворяющих принятому эмпирическому критерию, для которых разность лучевых скоростей компонентов превышает 10 км/с, в 32 случаях номинальные ошибки определения лучевой скорости достаточно велики, чтобы объяснять такое расхождение. Сопоставление данных об оставшихся 14 парах с базами данных SIMBAD и BDB [10] показывает, что в их состав входят вращательно-переменные (тип переменности *rotating variables* в Общем каталоге переменных звезд [11]) и спектрально-двойные звезды, в связи с чем определенная в рамках Gaia DR2 лучевая скорость может быть связана с ины-

ми, чем пространственное движение, эффектами. Для двух пар, отождествленных с двойными звездами HD 53229 и HD 95123, лучевые скорости слабых компонентов определены равными соответственно +568 и –715 км/с, при лучевых скоростях главных компонентов 14 и 28 км/с. Это может быть проявлением эффекта некорректного определения лучевых скоростей в плотных звездных полях (см. Gaia DR2 Known Issues, а также [12]), поскольку угловое разделение между компонентами в этих парах составляет 4.6 и 4.5 mas соответственно.

10 358 пар звезд, удовлетворяющие описанному эмпирическому критерию, составляют каталог кандидатов в широкие двойные системы, компоненты которых обладают общим собственным движением. Далее в тексте в отношении этих систем используется термин “двойные звезды”.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Полнота каталога

Степень полноты созданного каталога широких двойных систем на расстоянии от 10 до 100 pc от Солнца определяется несколькими факторами. Во-первых, она ограничена степенью полноты Gaia DR2. Известно, что каталог Gaia DR2 су-

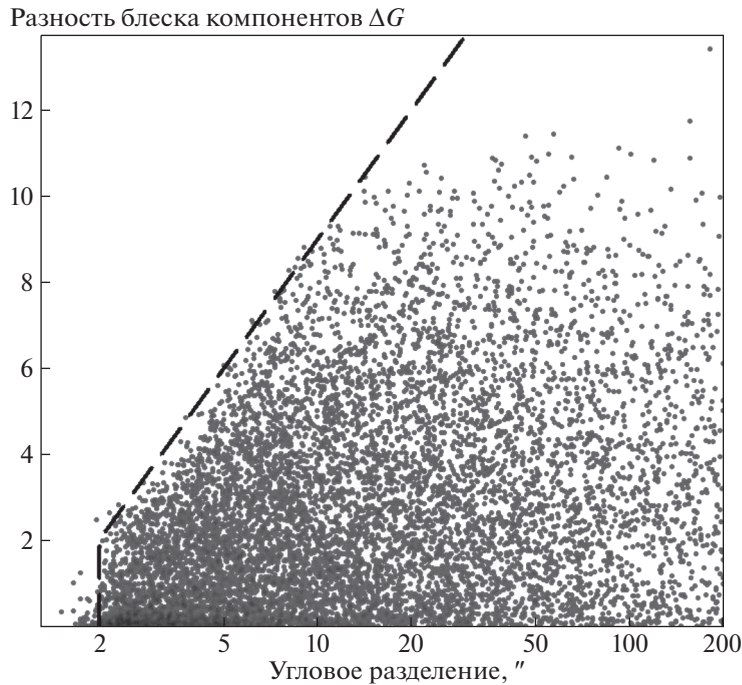


Рис. 4. Связь предельной разницы блеска компонентов с угловым разделением. Предельная разница блеска с определенным моментом пропорциональна логарифму углового разделения: штриховой линией для $\rho \geq 2''$ проведен лимит $\Delta G_{\text{lim}} < 10 \lg \rho$.

щественно неполон для звезд ярче примерно $G \approx 6^m$, практически достигая полноты только для интервала звездных величин $12 \leq G \leq 17$ [8]. Кроме того, неполнота каталога может проявляться для звезд с высоким собственным движением (в близкой окрестности Солнца таких звезд больше) и в плотных звездных полях.

Неоднородность покрытия источниками Gaia DR2 небесной сферы в микромасштабе, отражающая закон сканирования, равно как и полное удаление из созданного каталога источников, ассоциированных со скоплениями, не должны оказывать принципиального влияния на свойства полученной выборки.

Кроме того, на полноту результирующего каталога двойных звезд влияет способ отбора источников из данных Gaia DR2: (а) нами были отобраны только те, для которых в каталоге представлены параллаксы; (б) мы применили фильтры для отбора “астрометрически чистых” решений. При этом фильтр по относительной ошибке параллакса отсеивает преимущественно более далекие звезды. Вероятность пройти эти фильтры (т.е. иметь достаточно высокое качество астрометрического и фотометрического решения), в частности, ниже среднего для неразрешенных двойных звезд и компонентов двойных с выраженным орбитальным движением, и равна нулю для пар, угловое расстояние между компонентами которых

меньше или равно 2 mas. Для угловых расстояний между компонентами, больших 2 mas, связь предельного углового разрешения с разностью блеска между компонентами выражается соотношением $\Delta G_{\text{lim}} \propto \lg \rho$ for $\rho \geq 2$ мсд (см. также обсуждение в [13]). Этот эффект селекции, очевидно, преимущественно выделяет на малых угловых расстояниях пары с малой разностью блеска (см. рис. 4).

Даже после исключения из рассмотрения областей пространства, в которых расположены звезды скоплений Гиады и Мамајек 1, каталог содержит заметное количество пар, один или оба компонента которых входят в более чем одну пару. Как показывает отношение расстояний между компонентами в группах звезд, состоящих из более чем одной пары, среди них могут быть иерархические кратные звездные системы; однако скорее всего, в основном, это звезды движущихся групп. Обнаружено около 400 пар, имеющих общий компонент с другой парой. Они были удалены из каталога, чтобы избежать искажений при анализе характеристик ансамбля двойных звезд. После отсева кратных звезд в выборке остается 9977 пар.

Из общих соображений можно было бы ожидать, что часть компонентов пар из каталога (10–13%, основываясь на статистике кратности [14, 3]) может быть представлена неразрешенными

двойными звездами (см. также обсуждение пар с различающимися лучевыми скоростями компонентов в разделе 2). С другой стороны, принятый при составлении каталога порядок фильтрации источников по качеству астрометрического и фотометрического решения должен снизить эту долю. Проведенное авторами исследование показателей качества решения DR2 (RUWE, Flux Excess Factor) для известных тесных двойных звезд ($\rho \leq 2$ mas), взятых из каталога идентификаторов двойных и кратных звезд ILB [15] показало следующее. 3537 тесных пар отождествлены как неразрешенная двойная звезда с источниками Gaia DR2, для которых определены значения параллакса $\varpi \geq 10$ mas. Из этих источников Gaia DR2 принятый фильтр по качеству решения не проходят 2180, или 62%. Для сравнения, из отождествлений источников Gaia DR2 со звездами Hipparcos тот же фильтр не проходят лишь 8% объектов. Это позволяет предположить, что использование рекомендованных фильтров привело, в частности, к существенному снижению числа компонентов, являющихся неразрешенными двойными звездами.

3.2. Анализ свойств выборки

Рассмотрим распределение пар выборки по угловому разделению между компонентами (рис. 5а), по расстоянию между компонентами в проекции на небесную сферу (рис. 5б) и в линейном пространстве (рис. 5в). Распределение по угловому разделению между компонентами (рис. 5а) в логарифмической шкале оказывается плоским в диапазоне $3 \leq \rho \leq 20''$, и убывающим при больших значениях ρ . Отметим, что, хотя значение параллакса участвует в вычислении обоих линейных расстояний, точность его определения более существенна для расстояния в трехмерном пространстве. Это отражается на распределениях: распределение по проекции расстояния между компонентами (рис. 5б) имеет сходный характер с распределением на рис. 5а, убывая линейно в логарифмической шкале после 300–400 а. е. (что согласуется с оценкой $10^{2.5}$ а. е. [13]). Распределение же по расстоянию между компонентами в трехмерном пространстве в логарифмической шкале возрастает до ≈ 0.5 пк, т.е. до 10^5 а. е.

Несмотря на принятое ограничение на относительную ошибку параллакса, равную 10%, при расстояниях между компонентами, характерных для двойных звезд, малые относительные ошибки параллакса могут привести к большим относительным ошибкам определения расстояния между звездами. Чтобы отдельно рассмотреть распределение по параметрам более чистой, хоть и менее полной выборки, мы вводим подвыборку двойных звезд, в которых оценка номинальной ошибки

определения расстояния по параллаксу составляет не более 0.1 пк: $\delta_d < 0.1$, $\delta_d = \frac{1000}{\varpi - \delta_\varpi} - \frac{1000}{\varpi}$ (назовем ее выборка I). На рис. 5 распределения для выборки I представлены серой гистограммой с заливкой. Видно, что введение ограничения на ошибку расстояния значительно уменьшает долю двойных с крайне большими разделениями (более 50 000 а. е.), и приводит к смещению максимума распределения в логарифмической шкале в сторону меньших значений.

Мы используем абсолютные звездные величины в фотометрической полосе G и цвет, полученный из разности звездных величин в полосах BP и RP Gaia, чтобы построить диаграмму Герцшпрунга–Расселла (рис. 6). По положению на диаграмме можно выделить компоненты, принадлежащие к главной последовательности, для которых оцениваем массы с использованием таблиц Мамажека⁴ по абсолютной звездной величине в полосе G . При этом мы пренебрегаем вероятностью нахождения в каталоге неразрешенных двойных звезд и звезд на стадии эволюции до главной последовательности, хотя такие объекты могут присутствовать в выборке.

Это позволяет перейти к распределению по отношению масс $q = \frac{M_B}{M_A}$ для пар, в которых оба компонента предположительно находятся на главной последовательности (см. рис. 7). В области $0.3 \leq q \leq 0.9$ распределение выглядит близким к плоскому, тогда как в области $q \geq 0.95$ обнаруживается избыток двойных звезд (т.н. звезды-близнецы, с компонентами близких масс). Важно выяснить, отражает ли такая особенность природу широких двойных звезд, или связана с эффектами селекции выборки.

3.3. Функция селективности каталога

Как обсуждалось выше, эффекты селекции, которым подвержена выборка, представляют собой комбинацию функции селективности Gaia DR2 с заданными фильтрами качества решения для одиночных звезд, и функции селективности пар. Создадим выборку случайных пар звезд из Gaia DR2 с $\varpi < 15$ мсд (для ограничения объема выборки), отобранных с выполнением тех же требований к качеству решения, что предъявлялись к компонентам пар в разделе 2. Выберем из этих пар с помощью диаграммы Герцшпрунга–Расселла те, где оба компонента принадлежат главной последовательности, оценим для них массы компонентов и построим распределение по отношению массы более слабого (“вторичного”) ком-

⁴ http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVI-JHK_colors_Teff.txt

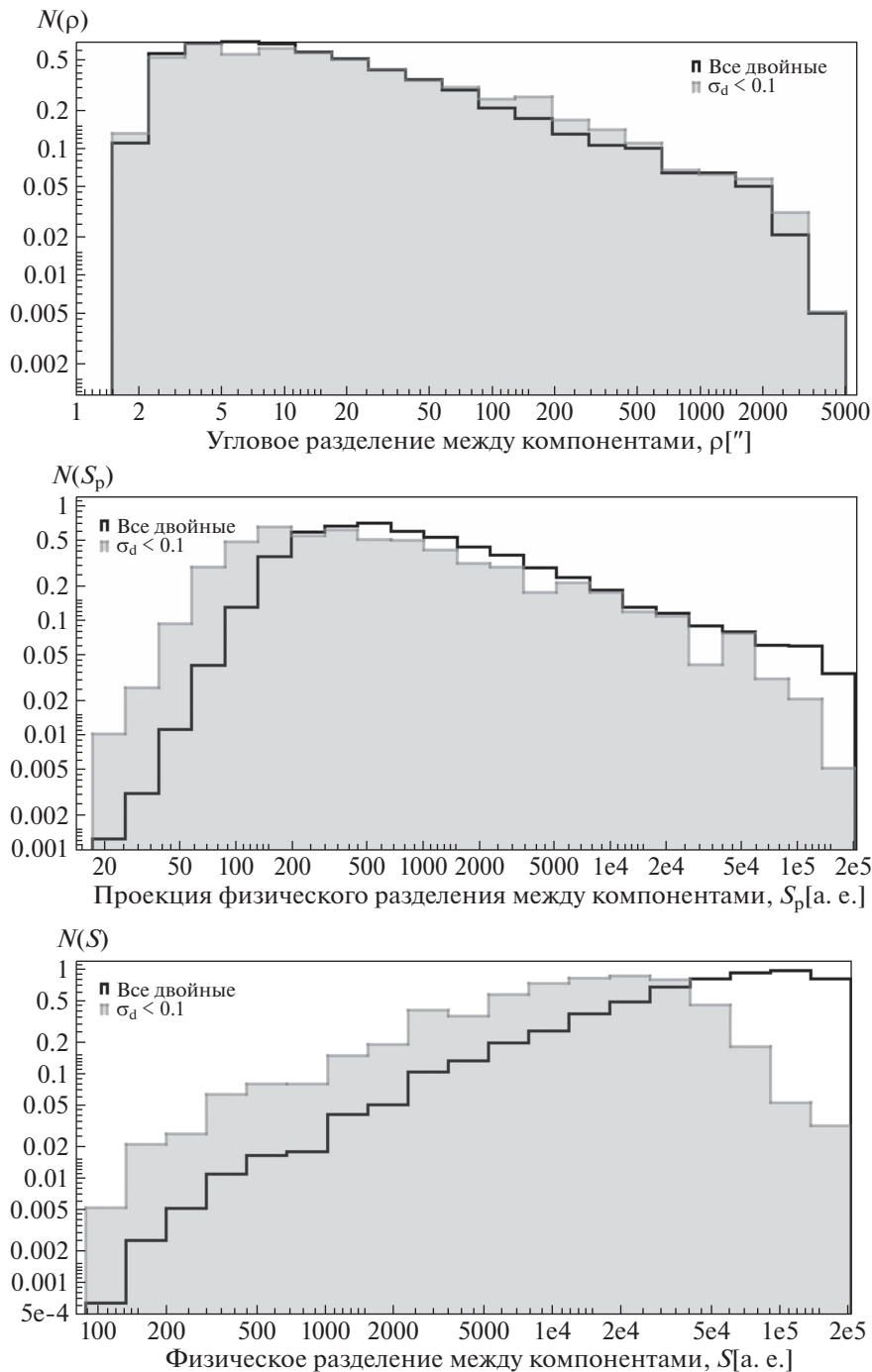


Рис. 5. Нормализованные распределения (сверху вниз): по угловому разделению между компонентами (а), по проекции физического разделения между компонентами (б), и по физическому разделению между компонентами в трехмерном пространстве (в). Черной линией показаны все двойные, серой заливкой – только удовлетворяющие требованию по ошибке определения расстояния не более 0.1 пк для обоих компонентов.

понента к массе более яркого (“главного”). На рис. 7 представлено распределение по отношению масс для выборки широких двойных звезд в сравнении с аналогичным распределением для синтезированной случайной выборки. Видно, что функция селективности Gaia DR2 в комбинации

с использованными фильтрами качества решения для компонентов не может быть причиной возникновения “пика близнецов”.

Для того, чтобы исследовать, как функция селективности пар, связанная с неодинаковой видимостью звезд с разным контрастом на одном и

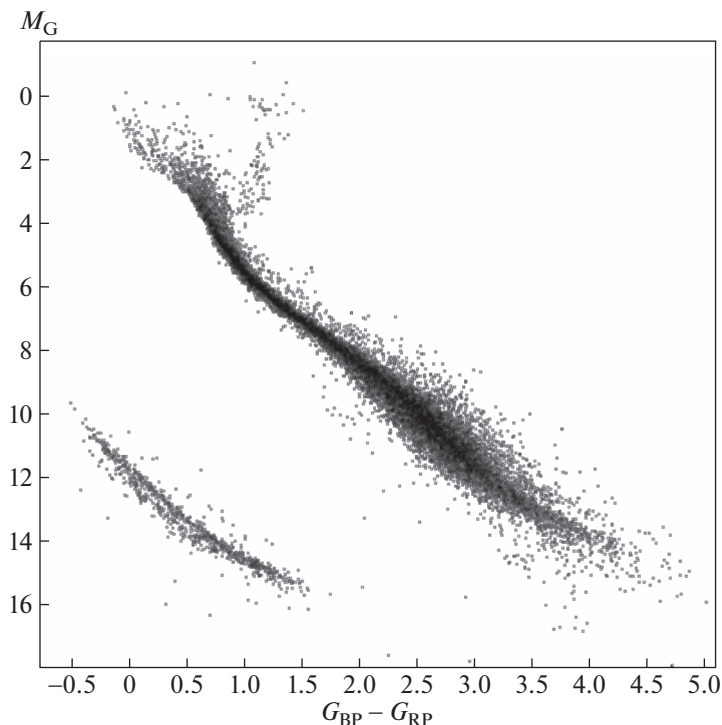


Рис. 6. Диаграмма “цвет–абсолютная звездная величина” для всех компонентов двойных звезд каталога.

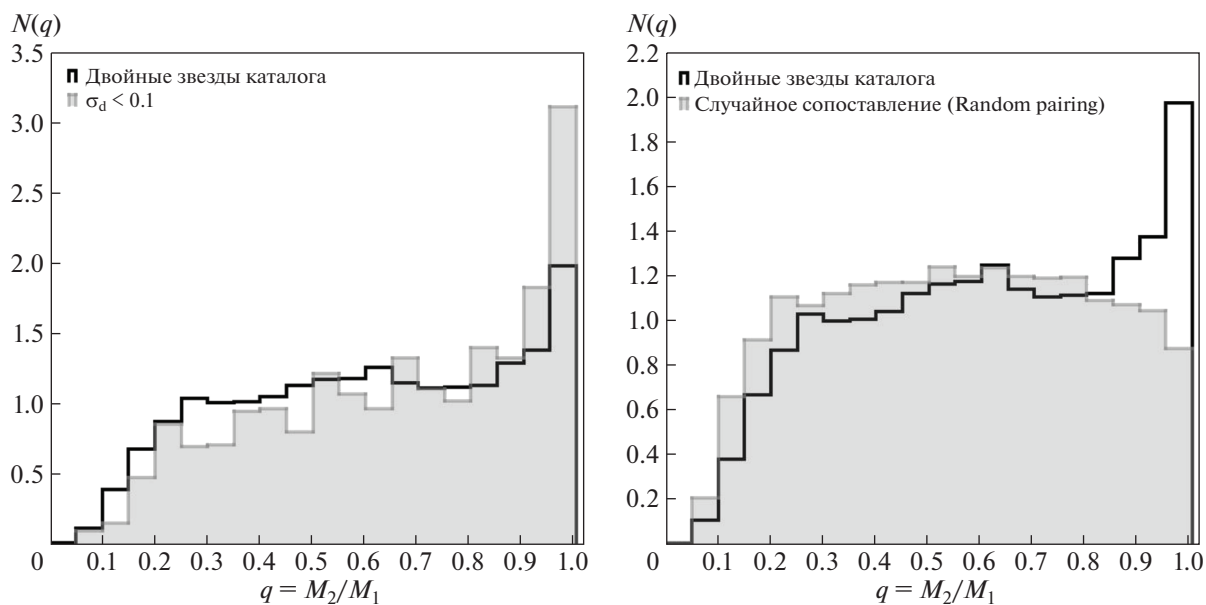


Рис. 7. Нормализованные распределения по отношению масс qM_2/M_1 . Слева – для всего каталога (сплошная линия) и для подвыборки с ограничением на максимальную ошибку определения расстояния (линия с заливкой). Справа – сравнение распределения для нашего каталога (сплошная линия) с распределением для “random pairing” – выборке двойных звезд, полученной случайным сопоставлением попарно звезд из Gaia (линия с заливкой).

том же угловом расстоянии, может исказить наблюдаемое распределение двойных по отношению масс, мы смоделируем этот эффект с исполь-

зованием программы популяционного синтеза двойных систем [16] при различных предположениях о механизмах (“сценариях”) формирования

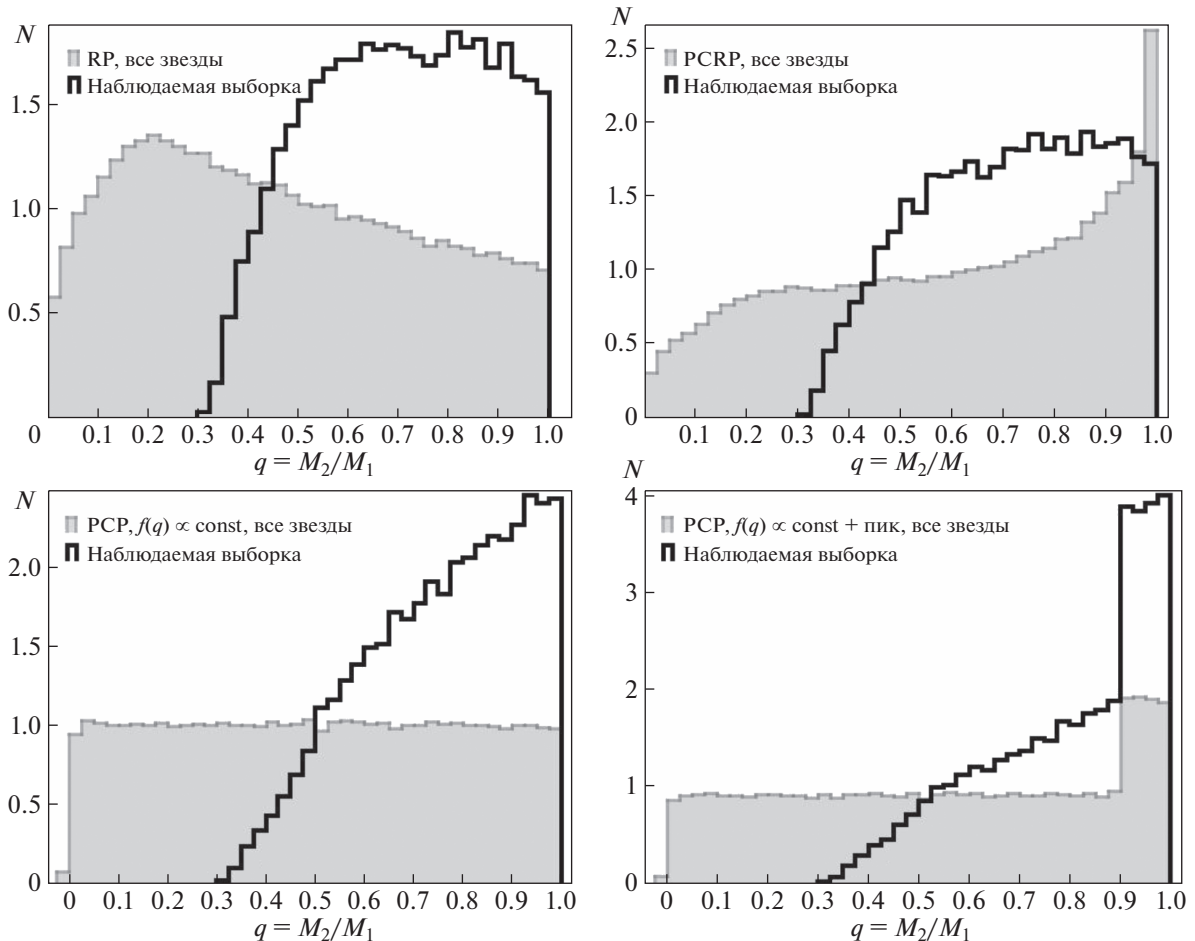


Рис. 8. Нормализованное распределение по отношению масс компонентов q для смоделированного в различных предположениях о сценариях образования пар звезд ансамбля двойных звезд в окрестности 100 пк от Солнца (серая гистограмма с заливкой) и его наблюдаемой, с имитацией функции селективности каталога, часть (черная контурная гистограмма) (подробности в тексте).

двойных систем [17]. Использовалась начальная функция масс (НФМ) Кроуи [18], при этом исследовались различные сценарии комбинирования масс компонентов, предполагающие распределение масс компонентов по отдельности, и/или суммы масс компонентов, в соответствии с НФМ. Для сценариев, предполагающих, что распределение по отношению масс компонентов есть свободный параметр, рассматривались различные варианты $f(q)$, в том числе $f(q) \propto C$. Распределение по величине большой полуоси орбиты выбиралось показательным вида $f(a) \propto a^\beta$, причем, поскольку было обнаружено, что значение показателя не влияет на вид распределения по отношению масс компонентов, было принято значение $\beta = -1$. Распределение пар по эксцентриситету считалось плоским. Для каждой из таких комбинаций начальных условий была смоделирована окрестность Солнца в пределах 100 пк. Скорость звездообразования на протяжении

14 млрд. лет принималась равной $15e^{-t/\tau}$, где $\tau = 7$ млрд. лет [19].

Эволюция звезд описывалась приближенными формулами Харли и др. [20]. Затем смоделированная выборка сопоставлялась с той ее частью, которая оказалась бы “видимой” при заданных условиях, включающих требование принадлежности обоих компонентов звездам главной последовательности, ограничения по видимой звездной величине $6^m \leq G \leq 17^m$, соответствующие ограничениям Gaia DR2, и функцию селективности пар (раздел 3.1). Было обнаружено, что ни в одном из исследованных сценариев функция селективности каталога в отношении двойных систем не приводит к образованию выраженного пика в области звезд с компонентами близких масс. Более того, если (в сценариях образования пар, позволяющих независимое распределение по отношению масс компонентов) ввести подоб-

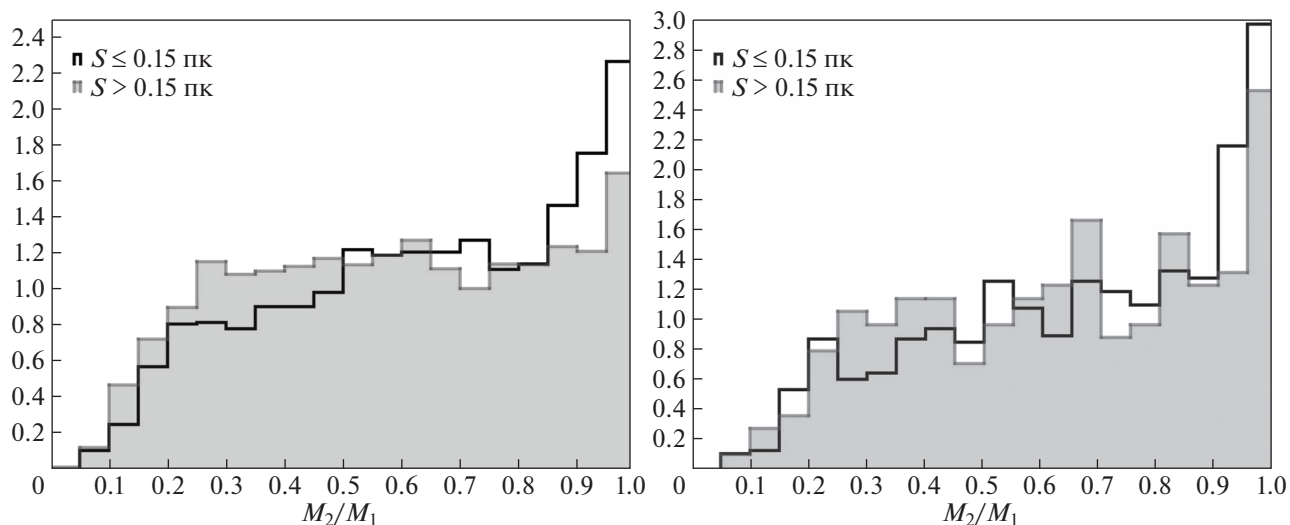


Рис. 9. Нормализованные распределения по отношению масс $q = M_2/M_1$ для двойных звезд с разделением в трехмерном пространстве не более 0.15 пк (сплошная линия) и более 0.15 пк (линия с заливкой). Слева — для всего каталога, справа — для подвыборки с ограничением на ошибку определения расстояния в 0.1 пк.

ный пик искусственно, принятые “наблюдательные” фильтры не оказывают заметного воздействия на наличие и форму этого пика. На рис. 8 приведены нормализованные распределения модельной выборки по отношению масс компонентов для пар, “существующих” в модели, в сравнении с “наблюдаемыми” при заданных ограничениях, для некоторых комбинаций начальных условий. Здесь приведены сценарии: RP — “random pairing” (оба компонента независимо друг от друга образуются с массами, которые выбираются из НФМ) (верхняя панель, слева), РСРР — “primary constrained random pairing” (главный компонент образуется как в RP, вторичный — с массой из НФМ при условии, что она не больше массы главного компонента) (верхняя панель, справа), сценарий РСР — “primary constrained pairing” (главный компонент образуется как в RP, масса вторичного определяется независимо заданным распределением по отношению масс компонентов) представлен на нижней панели для случая плоского распределения по массам компонентов (слева), и плоского распределения с пиком (ступенькой) для $q \geq 0.9$ (справа). Ни в одном из сценариев применение функции селективности каталога по ограничению видимости пар с близкими компонентами с большой разностью блеска не приводит к образованию “пика близнецов” на распределении по отношению масс, если его не было в начальной выборке. Пик в начальном распределении по сценарию РСРР исчезает при имитации наблюдений из-за того, что он образован наименее массивными звездами, обрезаясь ограничением видимой звездной величины. Пик близнецов в начальном распределении по

сценарию РСР с плоским распределением с пиком сохраняется в наблюдаемом распределении.

3.4. Звезды-близнецы

Таким образом, наличие избытка звезд-близнецов среди широких двойных следует признать действительно существующим. Этот результат был получен независимо от подробного исследования [21] и поддерживает сделанные выводы.

Избыток близнецов становится менее выраженным с увеличением разделения между компонентами: на рис. 9 можно увидеть, как на больших физических разделениях распределение по соотношению масс становится более плоским. Справа на том же рисунке показано распределение для выборки I с ограничением по ошибке расстояния. Заметно, что в выборке с более жестким ограничением на ошибку расстояния между компонентами пик близнецов более узкий и выраженный. Этому может быть несколько причин, и не исключено, что результирующий эффект достигается их совместным воздействием. Во-первых, среднее расстояние между компонентами в выборке I меньше (а на более близких расстояниях доля систем с компонентами-близнецами выше). Это может быть связано с тем, что механизм преимущественного формирования звезд-близнецов не эффективен для самых широких пар. С другой стороны, можно ожидать, что введение ограничения на ошибку определения расстояния для каталога приводит к уменьшению загрязнения выборки оптическими парами, расстояние между которыми занижено из-за ошибок параллакса. Примесь оптических пар, для которых

распределение по отношению масс падает в диапазоне $0.4 \leq q \leq 1$ (рис. 7), должна приводить к уменьшению доли звезд с большими q , поэтому, чем она меньше, тем более выражен должен быть “пик близнецов”.

Подробный обзор и обсуждение возможных каналов образования избытка широких двойных звезд с близкими массами компонентов, со ссылками, приведены в [21]. Отметим, что наиболее вероятный механизм — это конкурентный механизм аккреции на образующиеся компоненты пары в общем протозвездном диске, при которой компонент с изначально меньшей массой, обращаясь по орбите с большим радиусом, имеет возможность сравняться с изначально более массивным. Текущее затруднение состоит в том, что наибольшие наблюдаемые протозвездные диски вокруг образующихся двойных имеют радиус порядка нескольких сотен а. е. (напр., [22]), тогда как избыток звезд-близнецов, уменьшаясь с ростом расстояния между компонентами, продолжает быть значимым до расстояний дальше 3×10^4 а. е.

При дальнейшем увеличении расстояния между компонентами избыток звезд с близкими массами продолжает снижаться, и, насколько можно судить, совершенно исчезает для пар с вычисленным расстоянием между компонентами больше 8×10^4 а. е., для которых распределение по отношению масс компонентов становится плоским на всем диапазоне $0.3 \leq q \leq 1$. Такое распределение по отношению масс может быть результатом комбинации ряда факторов (присутствия изначально двойных звезд, орбита которых подверглась динамическому уширению [23]; доли пар, образованных при распаде скопления [24]; примеси оптических пар). Наконец, при анализе зависимости распределения по отношению масс от расстояния между компонентами следует принимать во внимание, что точность оценки самого этого расстояния сильно зависит от точности определения параллакс.

4. ВЫВОДЫ

С использованием данных каталога Gaia DR2 был создан каталог содвижущихся пар в окрестности 100 пк от Солнца. Предварительно отобранные по разделению между компонентами в трехмерном пространстве кандидаты в пары были отфильтрованы на основании выбранного эмпирического критерия, учитывающего собственные движения и физические разделения между компонентами пар, образовав каталог, включающий около 10 000 двойных и содвижущихся звезд. Степень неполноты результирующего каталога в основном определяется комбинацией функции селективности каталога Gaia DR2 для одиночных звезд, функции селективности Gaia DR2 для пар

звезд, и принятой при отборе источников Gaia DR2 системой фильтров качества астрометрического и фотометрического решения. В частности, показано, что существует зависимость между предельной разностью блеска для пары звезд и углового расстояния, на котором они могут быть обнаружены, до углового расстояния 10 mas, предложен вид этой зависимости. Показано, что использование фильтров качества решения приводит к тому, что минимальное угловое расстояние между компонентами в каталоге составляет 2 mas, а доля неразрешенных двойных среди компонентов пар каталога существенно (возможно, на величину до 60%) ниже, чем в среднем для звезд поля.

Проведена очистка каталога от содвижущихся групп с числом членов больше 2.

Показано, что распределение пар каталога по разделению в трехмерном пространстве демонстрирует распределение, отличающееся от распределения по проекции разделения на небесную сферу, из-за ошибок определения параллакс. Для уменьшения этого эффекта выделена подвыборка двойных с сильными ограничениями на ошибку определения расстояния.

По диаграмме Герцшпрунга–Расселла выбраны пары звезд, оба компонента которых предположительно принадлежат главной последовательности. Для таких пар оценены значения масс компонентов. Независимо от работы [21] получен результат, подтверждающий наличие избытка двойных систем — “близнецов” — с близкими массами компонентов. Показано, что обнаружение пика в выборке каталога не является следствием его функции селективности. Показано, что выраженность этого “пика близнецов” уменьшается с увеличением расстояния между компонентами, однако, полностью исчезая только на вычисленных расстояниях больше 8×10^4 а. е. Как и оценка, сделанная в работе [21], это существенно превышает величину наблюдающихся протозвездных дисков, где образуются двойные. Вместе с тем наличие избытка звезд-близнецов предполагает, что они образованы в ходе процесса, в котором массы компонентов зависимы друг от друга. Это требует исследования возможных механизмов значительного увеличения расстояния между компонентами пар, в том числе, при распаде звездных скоплений.

Приложение

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СПИСКА ЗВЕЗДНЫХ ПАР

В настоящем разделе описан алгоритм, разработанный для создания списка пар источников Gaia DR2, достаточно близко расположенных друг к другу в трехмерном пространстве α , δ , ϖ .

Создание списка двойных подразумевает попарные операции над звездами, что для множества из N звезд будет занимать CN^2 машинного времени. Это делает подобные расчеты слишком длительными для сколько-нибудь большой выборки звезд. Разумеется, имеет смысл сравнивать параметры лишь тех звезд, что имеют хотя бы какие-то шансы находиться в связанной паре, нет нужды тратить время расчетов на то, чтобы убедиться, что две звезды, расположенные на расстоянии 50 пк от Солнца в противоположных частях небесной сферы, не являются физической парой. Возможно ввести критерий, который будет отвечать на вопрос о том, имеет ли смысл для данной пары звезд проводить детальные расчеты (скажем, таким критерием может быть большое видимое угловое разделение) и определять сначала выполнение этого критерия, пропуская дальнейшие расчеты в случае неудовлетворения ему. Однако сам расчет такого критерия, проводимый попарно для всех звезд в выборке, все равно является задачей сложности CN^2 : отказываясь от дальнейших расчетов в случае неудовлетворения этому критерию, мы просто уменьшили C .

Более эффективным представляется создание алгоритма, который бы составлял список потенциальных пар в первом приближении. Этот алгоритм можно максимально оптимизировать, чтобы уменьшить выборку, над которой проводятся вычисления сложности CN^2 . Имея список кандидатов в пары вместо списка звезд, можно производить вычисления уже не попарно над всеми звездами, а подряд по имеющемуся списку, что существенно быстрее. Именно создание такого алгоритма и было первой (и значительной) частью этой работы.

Таким образом, на первом этапе работы ставится цель перевести задачу CN^2 в задачу CN . В список кандидатов было принято решение отбирать попарно все звезды, расположенные в трехмерном пространстве на расстоянии ближе 1 пк друг к другу. Расстояние рассчитывалось на основании небесных координат компонентов α_i , δ_i и оценок расстояний до них, вычисленных как величина, обратная значению параллакса ϖ . Использование таких оценок допустимо в силу того, что в исследуемом ансамбле достаточно близких звезд характерная ошибка определения параллакса Gaia DR2 $\frac{\epsilon_{\varpi}}{\varpi} < 10\%$.

Следующая проблема — определить, какие звезды подлежат попарному сравнению для проверки удовлетворения критерию близости. Пусть мы ищем пары из звезд, расстояние до которых от Солнца не менее некоторого фиксированного d . Очевидно, что начиная с какого-то углового раз-

деления θ между двумя звездами их физическое разделение не сможет быть меньше выбранного максимально допустимого. Решив простую геометрическую задачу, получим, что это угловое разделение равно $\theta = 2 \arcsin(p/2d)$, где p — максимальное физическое разделение, в нашем случае 1 пк. Пользуясь этим, мы можем выделить на небе прямоугольные в координатах (α, δ) области $(\alpha_1, \alpha_2; \delta_1, \delta_2)$ (далее будем называть их “участками”), ширина которых по обеим осям будет равна этому максимальному разделению. Таким образом, нам известно, что звезда с одной стороны от такого участка (например, $\alpha > \alpha_2$) не может быть парой со звездой с противоположной стороны ($\alpha < \alpha_1$). Важно заметить: далее в разделе о построении списка двойных выражение “не может быть парой” для удобства используется в значении “не может находиться на расстоянии ближе 1 пк друг от друга”. Разбиение на подобные участки дает нам возможность исключить из рассмотрения пары между звездами, лежащими через участок друг от друга. Стоит отметить, что размер такого прямоугольного участка по α будет больше, чем по δ : на больших склонениях тому же угловому разделению соответствует большее расстояние по прямому восхождению: $|\alpha_2 - \alpha_1| = \theta / \cos(\delta)$.

Разбиение по участкам делается в рамках больших областей размером в 1/4 полного круга по прямому восхождению и примерно двадцати градусов по склонению. В рамках одной большой области поправка ($|\alpha_2 - \alpha_1| = \theta / \cos(\delta)$) принимается наибольшей из возможных (т.е. выбирается для наибольшего в рамках данной области значения склонения). Таким образом, у каждой большой области имеется своя прямоугольная сетка разбиения на участки.

Проведя описанное разбиение, в рамках одной большой области мы проверяем все возможные пары и получаем выигрыш во времени вычислений. Исходя из сказанного выше, мы знаем, что для любой звезды пара может найтись только либо в этом же участке, либо в соседнем. Таким образом, мы оперируем двумя действиями: во-первых, проверкой расстояний между всеми звездами попарно в рамках одного участка, и, во-вторых, проверкой расстояний между всеми звездами в соседствующих участках (т.е. только связи между участками). Алгоритм выполнения этих двух действий реализован следующим образом, чтобы повторений не происходило. Последовательность выполнения графически изображена на рис. 10 на примере одного из шагов в середине прохода по большой области. Проход совершается в направлении увеличения прямого восхождения и смещается на следующий по склонению массив участков, когда проход по прямому вос-

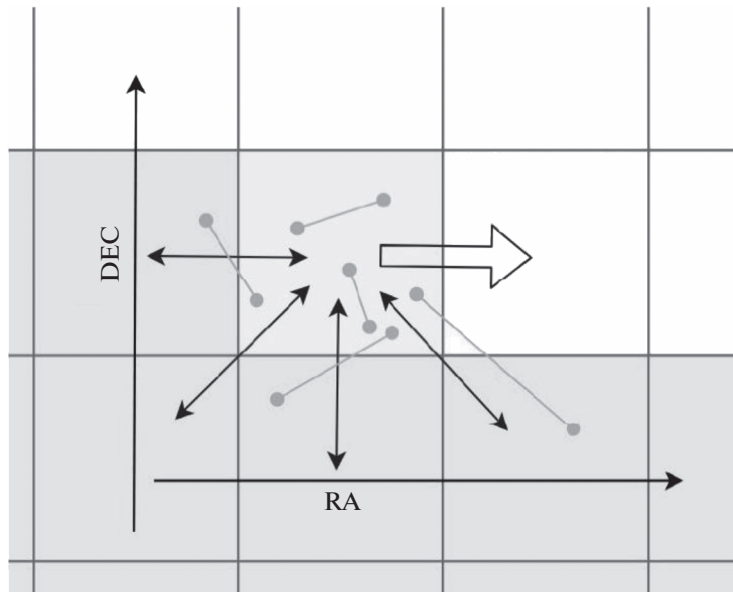


Рис. 10. Демонстрация последовательного прохождения по участкам с целью поиска двойных. Квадрат в центре, из которого расходятся стрелки, — проверяемый на данном шаге алгоритма участок. Другие затененные области показывают уже пройденные по алгоритму участки. 4 стрелки вниз и влево связывают те участки, наличие пар между звездами которых будет проверено на этом шаге. Серые кружки, соединенные линиями, представляют примеры пар, которые могут быть обнаружены на этом шаге: как внутри участка, так и “соседствующие”. Стрелка направо показывает, какой участок будет следующим, с большим прямым восхождением. Пары между текущим участком и участками с большим склонением или большим прямым восхождением будут проверены на более поздних шагах алгоритма.

хождению для данного склонения оказывается завершен. На каждом шаге выбирается участок, проверяется наличие пар между звездами внутри участка и наличие пар между звездами этого участка и четырех из восьми соседствующих участков. Остальные четыре “соседства” будут проверены на последующих шагах (см. рис. 10).

В рамках одной большой области алгоритм обеспечивает добавление в список потенциальных пар всех звезд ближе 1 пк друг к другу, после чего отдельно проверяются потенциальные пары, образованные звездами, лежащими по разные стороны границ между большими областями. Здесь снова проверку проходят только те из звезд, что лежат не далее, чем максимальное разделение θ от границы областей. После соединения всех этих областей для разных склонений непроверенными остаются только полярные области, для которых в силу стремления к бесконечности множителя $1/\cos(\delta)$ описанный выше алгоритм не подходит. Проверка пар в приполярных областях реализована для всего участка с радиусом по склонению, выбранному так, чтобы он был больше θ . Конечным результатом является список пар для всех участков небесной сферы.

Вся описанная выше процедура производится для “слоя”, ограниченного двумя значениями расстояния от проверяемых звезд до Солнца (вычисляемого по параллаксам Gaia): $d_1 < d < d_2$.

Максимальное угловое разделение θ соответственно определяется наименьшим из возможных расстояний d_1 . Для этого выборка $10 \leq d \leq 100$ пк была разбита на четыре слоя: от 10 до 25 пк, от 25 до 50 пк, от 50 до 75 пк и от 75 до 100 пк. Для каждого слоя отдельно определены значения θ и разбиение на участки. Таким образом, несмотря на большее количество звезд во внешних слоях, мы частично компенсируем возрастание времени вычислений уменьшением размера участков. Отдельно проверяются пары, образованные звездами, лежащими по разную сторону границ этих сферических слоев: это достигается взятием этих слоев с перекрытием, равным максимальному выбранному физическому разделению (в нашем случае 1 пк), и удалением пар, оба компонента которых лежат в перекрывающейся области из одного из этих наборов. Таким образом, мы избегаем включения их в список пар более одного раза, а за счет перекрытия учитываются те пары, которые лежат по разные стороны границы слоев.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа частично поддержана грантом РФФИ 19-07-01198.

БЛАГОДАРНОСТИ

В статье использованы данные миссии Европейского космического Агентства (ESA) *Gaia*⁵. Используются данные базы данных SIMBAD, поддерживаемой CDS, Страсбург, Франция. При отборе выборки звездных пар использовался программный пакет *astropy* [25, 26]. Обработка и анализ данных выполнены с использованием инструмента *Торкат*⁶ [27]. Авторы благодарят А.В. Тутукова и Д.А. Чулкова за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D. Godoy-Rivera and J. Chanamé*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **479**, 4440 (2018).
2. *S. P. Goodwin and P. Kroupa*, Astron. and Astrophys. **439**, 565 (2005).
3. *G. Duchêne and A. Kraus*, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. **51**, 269 (2013).
4. *F. M. Jiménez-Esteban, E. Solano, and C. Rodrigo*, Astron. J. **157**, id. 78 (2019).
5. *С. А. Сапожников, Д. А. Ковалева, О. Ю. Малков*, Научные труды ИНАСАН **3**, 366 (2019).
6. *C. A. L. Bailer-Jones*, Publ. Astron. Soc. Pacific **127**, 994 (2015).
7. *A. S. Rastorguev, N. D. Utkin, M. V. Zabolotskikh, A. K. Dambis, A. T. Bajkova, and V. V. Bobylev*, Astrophys. Bull. **72**, 122 (2017).
8. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, Astron. and Astrophys. **616**, id. A1 (2018).
9. *L. Lindegren, J. Hernández, A. Bombrun, S. Klioner, et al.*, Astron. and Astrophys. **616**, id. A2 (2018).
10. *D. Kovaleva, P. Kaygorodov, O. Malkov, B. Debray, and E. Oblak*, Astron. and Comput. **11**, 119 (2015).
11. *N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova*, Astron. Rep. **61**, 80 (2017).
12. *D. Boubert, J. Strader, D. Aguado, G. Seabroke, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **486**(2), 2618 (2019).
13. *K. El-Badry and H.-W. Rix*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **480**, 4884 (2018).
14. *A. Tokovinin*, Astron. J. **147**(4), id. 87 (2014).
15. *O. Malkov, A. Karchevsky, P. Kaygorodov, and D. Kovaleva*, Baltic Astronomy **25**, 49 (2016).
16. *Y. M. Gebrehiwot, S. B. Tessema, O. Y. Malkov, D. A. Kovaleva, A. Y. Sytov, and A. V. Tutukov*, New Astronomy **61**, 24 (2018).
17. *M. B. N. Kouwenhoven, A. G. A. Brown, S. P. Goodwin, S. F. Portegies Zwart, and L. Kaper*, Astron. and Astrophys. **493**, 979 (2009).
18. *P. Kroupa*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **322**, 231 (2001).
19. *G. Nelemans, L. R. Yungelson, S. F. Portegies Zwart, and F. Verbunt*, Astron. and Astrophys. **365**, 491 (2001).
20. *J. R. Hurley, O. R. Pols, and C. A. Tout*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **315**, 543 (2000).
21. *K. El-Badry, H.-W. Rix, H. Tian, G. Duchêne, and M. Moe*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **489**, 5822 (2019).
22. *J. J. Tobin, K. M. Kratter, M. V. Persson, L. W. Looney, et al.*, Nature **538**, 483 (2016).
23. *P. Kroupa and A. Burkert*, **555**, 945 (2001).
24. *M. B. N. Kouwenhoven, S. P. Goodwin, R. J. Parker, M. B. Davies, D. Malmberg, and P. Kroupa*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **404**, 1835 (2010).
25. *T. P. Robitaille, E. J. Tollerud, P. Greenfield, M. Droettboom, et al.*, Astron. and Astrophys. **558**, id. A33 (2013).
26. *A. M. Price-Whelan, B. M. Sipőcz, H. M. Günther, P. L. Lim, et al.*, Astron. J. **156**, id. 123 (2018).
27. *M. B. Taylor*, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*, Proc. of the Conference held 24–27 October, 2004 in Pasadena, California, USA, edited by P. Shopbell, M. Britton, and R. Ebert (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005), ASP Conf. Ser. **347**, 29 (2005).

⁵ <https://www.cosmos.esa.int/gaia>

⁶ <http://www.starlink.ac.uk/topcat/> [27]