

ВИЗУАЛЬНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ С ИЗВЕСТНЫМИ ОРБИТАМИ В GAIA DR3

Д. А. Чулков

Институт астрономии РАН

Визуальные двойные звезды с известными орбитами используются для исследования каталога Gaia DR3. Показано, что 2/3 решений с угловым расстоянием между компонентами $0.2\text{--}0.5''$ имеют 2-параметрическое решение, не содержащее параллакса. Выявлено 16 оптических пар. Продемонстрированы примеры двойных с сильно различающимися измеренными параллаксами компонентов, при этом достоверно являющиеся физически связанными. Исследована недооценка заявленной погрешности параллакса в зависимости от параметра RUWE. Для дополнительного снабжения параллаксами проведен поиск далеких компонентов. Создано синтетическое соотношение «масса — светимость» для фотометрической полосы G . Выполнены оценки масс звездных систем с использованием третьего закона Кеплера и соотношения «масса — светимость».

VISUAL BINARY STARS WITH KNOWN ORBITS IN GAIA DR3

D. A. Chulkov

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Visual binary stars with known orbits are investigated to validate Gaia DR3 catalogue. It is shown that 2/3 of sample binaries with $0.2\text{--}0.2''$ angular separation have 2-parameter solution which lacks parallax. 16 optical pairs are revealed. Examples of genuine binaries with large deviation in the reported parallaxes of components are shown. Underestimation of the reported uncertainties depending on parameter RUWE is explored. The search for distant companions of binary stars is done for additional supply of parallaxes. Synthetic mass—luminosity relation for the G band is obtained to provide mass estimates along with masses calculated via Kepler's Third Law.

Введение

При наличии достаточно длительного ряда измерений, включающего в себя время наблюдения, угловое расстояние между компонентами и позиционный угол, для визуальной двойной звезды возможно аналитически рассчитать видимую и истинную орбиту. Информация о существующих решениях собрана в регулярно обновляемом шестом каталоге орбит визуальных двойных звезд (ORB6), включившим в себя на момент исследования 3350 пар звезд. Опубликованные орбитальные элементы включают в себя большую полуось в угловой мере и орбитальный период. Масштаб орбиты в общем случае неизвестен, и для определения линейного размера орбиты необходимо выяснить параллакс. В этой связи первоочередной задачей становится снабжение двойных звезд каталога ORB6 параллаксами.

Каталог Gaia DR3, вышедший в июне 2022 г., содержит свыше $1.8 \cdot 10^9$ объектов, из них почти $1.5 \cdot 10^9$ имеют полное решение, включающее в себя параллакс и собственное движение. Отметим, что каталог DR3 по сути является дополнением к вышедшему в декабре 2020 г. каталогу Gaia EDR3: астрометрические данные в каталоге EDR3 и главной таблице DR3 идентичны. Основные данные каталога Gaia DR3 созданы в предположении, что источники являются одиночными звездами. В тех случаях, когда неуязвка соответствующего решения велика, публикуется 2-параметрический набор параметров, исключаящий

параллакс. Gaia DR3 дополнительно включает около $0.8 \cdot 10^6$ специализированных решений для двойных звезд. 99 % таких решений относятся к системам с орбитальным периодом 0.28–1 500 суток. Таким образом, новые данные практически не пересекаются с ранее известными визуальными двойными, медианный период звезд ORB6 составляет 80 лет.

Разделенные двойные в Gaia

Блеск 90 % главных компонентов систем ORB6 превышает 10.5^m в полосе V , идентификация сравнительно ярких объектов в Gaia обычно не представляет трудности. Особое внимание уделяется кратным звездам, для которых важно выбрать правильный компонент. В Gaia отсутствуют наиболее яркие звезды с блеском выше 2.7^m , также не отождествлены отдельные объекты слабее 15^m . В общей сложности идентификация успешно проведена для 3 279 двойных звезд, причем в 753 случаях отождествлены оба компонента по отдельности. Отметим, что для 1 016 систем решения являются 2-параметрическими, их параллакс не опубликован. Тип решения зависит от углового расстояния между компонентами: диапазон $0.2\text{--}0.5''$ является наиболее проблемным, 2/3 двойных в этом интервале не имеют параллаксов в Gaia.

Теперь более детально рассмотрим 521 двойную звезду ORB6 с параллаксом ϖ и собственным движением μ , измеренным для обоих компонентов. Зная разность собственного движения компонентов $\Delta\mu$ и ϖ , можно оценить минимальную требуемую массу M_e , при которой звезды остаются гравитационно связанными (формула (1)). Для большинства систем выборки эта величина не превышает $21M_\odot$. В то же время для 16 пар $M_e > 100M_\odot$. Одновременно с этим опубликованные в Gaia DR3 параллаксы компонентов данных двойных существенно отличаются друг от друга, $\Delta\varpi/\sigma \geq 8$ (формула (2)). Такие системы мы считаем вероятными оптическими парами и исключаем из дальнейшего рассмотрения.

$$v[\text{км/с}] \approx \frac{4.74 \cdot \Delta\mu[\text{мс/год}]}{\varpi[\text{мс}]} ; r[\text{а. е.}] = \rho/\varpi ; M_e = \frac{rv^2}{2G_0} \left([\text{кг}] = \frac{\text{м} \cdot \text{М}^2 \text{с}^{-2}}{\text{М}^3 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-2}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\varpi}{\sigma} = \frac{|\varpi_1 - \varpi_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}. \quad (2)$$

Вместе с тем ряд двойных демонстрирует формально большое расхождение параллаксов при малом значении M_e . Для примера рассмотрим систему **WDS 12335+0901**. Измеренные в Gaia параллаксы составляют $\varpi_1 = 223.48 \pm 0.47$ и $\varpi_2 = 231.12 \pm 0.51$ миллисекунд, угловое расстояние между компонентами составляет $\rho = 1.15''$. В каталоге ORB6 орбитальный период этой системы оценивается в 16 лет, так что мы достоверно знаем, что это физическая двойная. Заметим, что собственный размер орбиты $\rho/\varpi \sim 5$ а. е. намного меньше расстояния вдоль луча зрения, которое можно формально предположить из разности параллаксов $1/\varpi_1 - 1/\varpi_2 \sim 0,15 \text{ пк} \sim 3 \cdot 10^4$ а. е. Таким образом, формальная разность параллаксов, достигающая $\Delta\varpi/\sigma = 11$, вызвана именно погрешностью измерений Gaia. Для **WDS 09551-2632** различие параллаксов еще больше и составляет $\Delta\varpi/\sigma = 18$.

В общей сложности для 41 % двойных ORB6 параллаксы вписываются в одну стандартную ошибку, для 79 % $\Delta\varpi/\sigma < 3$ (формула (2)). При нормальном распределении в 1σ должны укладываться 68.3 % измерений. Оказывается, что различие параллаксов компонентов зависит от величины параметра RUWE (χ), характеризующего в Gaia неувязку решения. В благоприятном случае ($\chi \sim 1$) параллаксы компонентов двойных лучше согласуются друг с другом (см. таблицу). Дополнительно исследуется размер поправки к погрешности параллакса $\sigma_i^* = \sigma_i k(\chi)$, при котором для 68.3 % значений будет выполняться условие $\Delta\varpi/\sigma^* < 1$. Величина погрешности недооценена в $k \sim 1.4$ раза для звезд с $\chi \sim 1.05$,

Согласие параллакс компонент (формула (2)) в зависимости от параметра RUWE (χ), характеризующего в Gaia невязку решения. Исследуются 505 двойных с полным астрометрическим решением для обоих компонент, вероятные оптические пары исключены. Выборка делится на 4 равные части согласно среднему χ компонентом, $\chi = (\chi_1 + \chi_2)/2$. 1Q: $\chi \leq 1.085$, 2Q: $1.085 < \chi < 1.341$, 3Q: $1.341 < \chi < 2.37$, 4Q: $\chi > 2.37$. Указано число двойных для каждого квартиля с согласием параллакс в рамках 5, 3, 2 и 1σ . Согласие лучше для систем с низким χ

	Квартиль RUWE			
	1Q	2Q	3Q	4Q
Σ звезд в квартиле	126	127	126	126
$\Delta\varpi/\sigma < 5$	125	125	112	105
$\Delta\varpi/\sigma < 3$	118	110	93	80
$\Delta\varpi/\sigma < 2$	104	89	67	48
$\Delta\varpi/\sigma < 1$	71	62	47	26

рекомендуемая поправка быстро возрастает до $k \sim 2.7$ при $\chi \sim 1.5$, далее постепенно достигая $k \sim 3.2$ при $\chi \sim 3.5$. Исследование $k(\chi)$ для больших значений χ невозможно из-за малости выборки.

Другие источники параллакс

Свыше чем для 30 % двойных звезд ORB6 в Gaia DR3 не доступны параллаксы компонент. Это обстоятельство заставляет прибегнуть к косвенным методам. Многие двойные звезды является частью кратной системы, в этом случае параллак можно заимствовать у третьего компонента. Ключевая задача состоит в проверке связи далекого компонента с двойной звездой, поскольку он может оказаться случайной проекцией. К счастью, для большинства интересующих нас объектов известно собственное движение μ , которое помогает выделить связанный с двойной компонент из числа звезд фона, определив минимальную массу, необходимую для гравитационной связи (формула (1)). Использование ранее известных параллакс Hipparcos в качестве априорной информации помогает дополнительно расширить число выявленных третьих компонент. Более детально с процедурой отбора можно ознакомиться в публикации [1]. В общей сложности было выявлено 548 третьих компонент ($\sim 17\%$ от полной выборки), причем в 196 случаях непосредственные компоненты двойной имеют 2-параметрическое решение, которое не содержит параллак.

Свыше четверти двойных ORB6 не имеют параллакс Gaia DR3 даже при использовании параллакс третьего компонента. Для дальнейшего обогащения параллаксами используются каталоги Gaia DR2, TGAS и Hipparcos. Любопытно, что для $\sim 35\%$ источников с 2-параметрическим решением в Gaia DR3 параллак имеется в Gaia DR2. Каталог DR2 построен на более коротком ряде наблюдений и также рассматривает все звезды как одиночные. Само отсутствие данных в DR3 служит индикатором ненадежности параллакс DR2, но в ряде случаев мы вынуждены им пользоваться из-за отсутствия альтернативы.

Оценка звездных масс

После определения параллакс мы переходим к оценке масс, в первую очередь с помощью третьего закона Кеплера. Определенная с его помощью величина включает в себя сумму масс внутри орбиты двойной звезды и потенциально может включать вклад невидимого компонента. Для подлинных двойных это простая арифметическая сумма масс главного и вторичного компонент. В тех случаях, когда параллаксы обоих компонент измерены независимо, используется взвешенное арифметическое среднее. Масса выражена в солнеч-

ных единицах M_{\odot} , если большая полуось a'' и параллакс ϖ указаны в одной мере, а период P в годах. Величины a'' и P берутся согласно данным каталога ORB6.

$$M_d = \frac{a^3}{P^2} = \frac{a''^3}{\varpi^3 P^2}. \quad (3)$$

Другой способ применим лишь к звездам главной последовательности и использует соотношение «масса — светимость». Данная зависимость была независимо замечена сто лет назад Герцшпрунгом и Расселом как раз при анализе наблюдений визуальных двойных звезд. Главная последовательность включает в себя звезды различного эволюционного статуса и металличности, благодаря чему соотношение является полосой, а не тонкой линией. На сегодняшний день зависимость достаточно хорошо известна в болометрической или фотометрической системе UBV , однако готовое решение для блесков Gaia в литературе не было найдено. Для его создания использовались синтетические эволюционные треки MIST и изохроны PARSEC, эмпирические данные о соотношении «масса — светимость» в полосе V привлекались для калибровки. Как и следовало ожидать, начальная главная последовательность (ZAMS) близка к эмпирическому соотношению «масса — светимость» для маломассивных звезд, время жизни которых сравнимо или превышает хаббловский возраст Вселенной. Массивные звезды заметно отходят от ZAMS, для них необходимо использовать более продвинутые эволюционные стадии. Для использования соотношения «масса — светимость» необходимо осуществить переход от опубликованных в каталоге видимых звездных величин g к абсолютным G . В указанной ниже формуле параллакс ϖ измеряется в угловых секундах. Для оценки поглощения A_G , вклад которого невелик для большинства звезд, используется трехмерная модель Stilism. Наконец, $\sigma_{\text{MLR}} = 0.4^m$ используется как оценка собственной ширины соотношения «масса — светимость» и сопутствующей погрешности.

$$G = g + 5 + 5 \log \varpi - A_G + \sigma_{\text{MLR}}. \quad (4)$$

Для разделенных в Gaia систем, у которых известны блески обоих компонентов, возможно непосредственное сравнение динамической (вычисленной через закон Кеплера) и фотометрической массы (рассчитанной с помощью соотношения «масса — светимость»). Поскольку динамическая масса характеризует общую массу системы, для сравнения используется сумма фотометрических масс главного и вторичного компонентов. Массы вычисляются для всех доступных значений параллаксов, и в дальнейшем выбирается значение, позволяющее достичь наилучшего согласия двух оценок масс. Отличие динамической и суммарной фотометрической массы может быть вызвано массой факторов, к которым относятся ошибки орбитальных элементов, заявленных в ORB6, неточность параллаксов, неразрешенная двойственность или продвинутая стадия эволюции звезды, ведущая к некорректному использованию соотношения «масса — светимость». В общем случае может быть сложно выявить, какая причина или их комбинация ответственна за расхождение оценок. В целом для 326 из 731 разделенных двойных оценки динамической и фотометрической массы согласуются в рамках 20 %, причем эта доля достигает 75 % для систем с надежными орбитами. Большинство звезд ORB6 являются неразделенными источниками в Gaia, для них оценка фотометрической массы затруднена без априорных предположений о разности блеска компонентов. Рассматриваются две крайние гипотезы, предусматривающие равный либо пренебрежимый вклад вторичного компонента по отношению к главному. В первом случае блеск каждого компонента уменьшается на $\sim 0.75^m$ по сравнению с заявленным в Gaia. Детально см. [1]. Данные доступны в Vizier.

Библиографические ссылки

- [1] *Chulkov Dmitry, Malkov Oleg*. Visual binary stars with known orbits in Gaia EDR3 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2022. — Vol. 517, № 2. — P. 2925—2941. 2206.00604.