

СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД

ЦВЕТКОВ Александр Станиславович,

кандидат физико-математических наук
СПбГУ

DOI: 10.7868/50044394826040067

Поступила в редакцию: 31.07.2026
Принята к публикации: 05.08.2026

Астрометрия и звездная кинематика не так известны широкой публике, как астрофизика, космология. Но именно с этих разделов начиналась астрономия. Практически вся античная и средневековая астрономия – это астрометрия. Создавались звездные каталоги, открывались различные явления: прецессия и абберрация света, параллактические смещения и собственные движения. Именно благодаря точным звездным каталогам были открыты законы Кеплера, которые привели Ньютона к созданию современной механики. На успехах астрометрии базируются достижения космологии, проверка эффектов общей теории относительности и многое другое. Одним из достижений точных наблюдений стало обнаружение изменений координат звезд со временем, которое назвали «собственное движение звезд». Данная статья рассказывает об истории открытия, причинах собственных движений и некоторых приложениях.

ЭПОХА НЕПОДВИЖНЫХ ЗВЕЗД

Наблюдения звездного неба велись еще в глубокой древности в доисторическую эпоху. Позже в античном мире были созданы первые звездные каталоги, которые использовались с практическими целями: ведение календаря, определение времени, навигация на море. Было отмечено, что на небесной сфере наблюдаются «подвижные объекты»: Солнце, Луна, планеты, иногда появляются кометы (которые, однако, часто относили к атмосферным явлениям). Серьезная работа по созданию звездных каталогов велась древнегреческими астрономами. В Александрии в первой половине III в. до н.э. в этом направлении работали Тимохарис и Аристилл, но наиболее точные измерения осуществил Гиппарх, создавший к 129 г. до н.э. каталог из 850 звезд. Он же открыл и явление

прецессии равноденствий, сравнив измеренные им координаты с данными Тимохариса, верно заметив, что между его измерениями и данными Тимохариса отличаются лишь эклиптические долготы, но не широты. Кстати именно поэтому звездные каталоги в античные времена и в Средневековье публиковались именно в эклиптической системе координат. Объяснить причину прецессии смог лишь Исаак Ньютон через полторы тысячи лет, а окончательную теорию прецессии и нутации разработал Леонард Эйлер в XVIII в. Гиппарх же был первым, кто предложил гипотезу о возможном изменении взаимных угловых расстояний между звездами, но ни в то время, ни в более поздние века этого обнаружено не было. Даже в описании гелиоцентрической системы мира Иоганном Кеплером употреблялся термин *sphaera stellar fixar*, т.е. «сфера неподвижных звезд» (рис. 1).

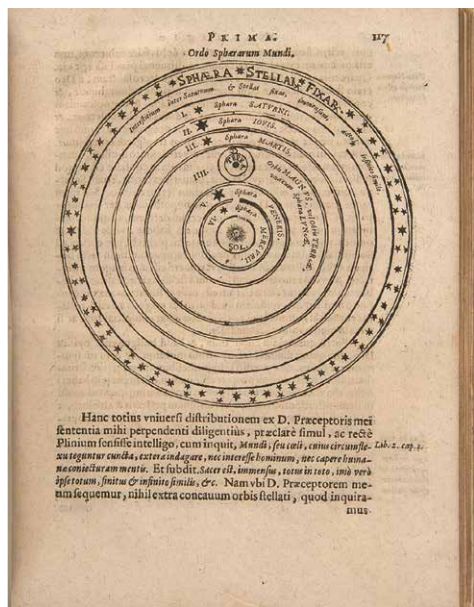


Рис. 1. Иоганн Кеплер. *Mysterium Cosmographicum*, 1596. Гелиоцентрическая модель Кеплера, на которой изображена *sphaera stellarum fixarum* («сфера неподвижных звезд»). Источник: *GalileosWorld – Астрономическая картинка дня Image of the Day*

ОТКРЫТИЕ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Впервые изменчивость «сферы неподвижных звезд» заметил в 1718 г. друг Исаака Ньютона Эдмунд Галлей (правильнее произносить *Хэлли*). Для уточнения постоянной прецессии он сравнил современные ему каталоги звезд с античными, и прежде всего с звездным каталогом Гиппарха из «Альмагеста» Птолемея. На фоне однородной картины закономерного смещения всех звезд в силу прецессии Галлей обнаружил удивительный факт: некоторые яркие звезды из каталога Гиппарха–Птолемея заметно изменили свои положения среди других звезд. Это были: Сириус, сместившийся к югу почти на полтора

диаметра Луны, Арктур – на два диаметра к югу и Альдебаран, сместившийся на четверть диаметра Луны к востоку.

Замеченные изменения нельзя было приписать ошибкам каталога Птолемея, не превосходившим, как правило, 6' (1/5 диаметра Луны). Открытие Галлея в 1728 г. подтверждено Джеймсом Брайлем (правильно произносится *Бредли*), который в своих попытках обнаружить параллакс звезд открыл явление аберрации света, определил с высокой точностью скорость света, открыл нутацию земной оси и в 1742 г. был избран директором Гринвичской обсерватории. Точность измерения им положений звезд не позволила еще ему определить параллаксы, но уверенно показала наличие изменений координат звезд, которые назвали «собственными движениями» (англ. *proper motions*).

В дальнейшем определениями движений звезд занимались исследователь Луны, создатель полной теории пассажного инструмента Тобиас Майер (1723–1762), который опубликовал каталог 998 зодиакальных звезд, и французский аббат и астроном Никола Лакайль (1713–1762), известный тем, что он впервые определил достаточно точно суточный параллакс Солнца, составил таблицы атмосферной рефракции.

Начало современной фундаментальной системы определения положения звезд положил Фридрих Бессель (1784–1846) – основатель Кенигсбергской обсерватории, первооткрыватель годичного параллакса (61 Лебедя). Точность его наблюдений позволила предсказать в 1844 г. наличие невидимых спутников у Проциона и Сириуса, что было подтверждено уже в XX в. Звездный каталог Бесселя содержит 75 000 объектов. В обработке сигналов широко используются функции Бесселя (рис. 2). Начиная с каталогов Бесселя в качестве обязательных параметров помимо координат



Рис. 2. Почтовая марка Западной Германии 1984 г., посвященная 200-летию со дня рождения Ф. Бесселя, с изображением графиков функций Бесселя. Источник: сайт «Моя коллекция», <http://mycollection48.ru>

и звездной величины стали указывать собственные движения звезд.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Для того чтобы определить собственное движение конкретной звезды, необходимо определить ее координаты как минимум в двух эпохах, разнесенных на достаточное количество лет. Это может быть 20, 30, 50 и даже 100 лет (для наземных наблюдений). Исключения составляют космические наблюдения, которые длятся всего несколько лет. В этом случае мы можем написать

$$\mu_{\alpha} = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{t_1 - t_0}, \quad \mu_{\delta} = \frac{\delta_1 - \delta_0}{t_1 - t_0}.$$

Здесь α и δ – прямое восхождение и склонение – экваториальные координаты звезды для двух эпох, $t_1 - t_0$ – разность эпох в годах, μ_{α} , μ_{δ} – собственные движения по прямому восхождению и по склонению. Измеряются обычно собственные движения в угловых секун-

дах в 100 лет (″/cy), а в последнее время – в миллисекундах дуги в год (мсд/год, mas/yr). На практике обычно используют не два наблюдения, а целые ряды наблюдений, с тем, чтобы повысить точность определения собственных движений и указать не только сами значения, но и их погрешности.

Следует отметить, что координатные линии склонения, вдоль которых отсчитывается прямое восхождение, не являются большими кругами небесной сферы, поэтому скорость изменения координаты α не является компонентой угловой скорости светила, в отличие от скорости изменения координаты δ (рис. 3). Поэтому обычно в каталогах приводится не сама величина μ_{α} , а ее произведение на косинус склонения:

$$\mu_{\alpha}^* = \mu_{\alpha} \cos \delta$$

С использованием этой величины можно рассматривать полное собственное движение

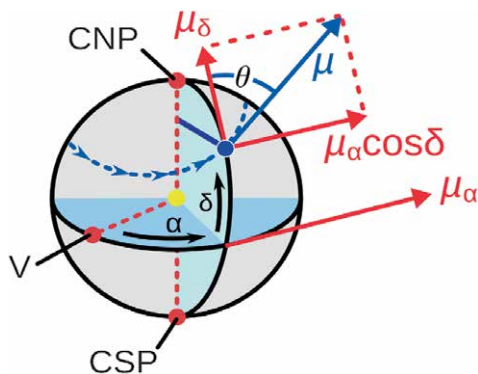


Рис. 3. Компоненты собственного движения звезды на небесной сфере. Северный и южный полюса мира обозначены как CNP и CSP, точка весеннего равноденствия – V, направление движения звезды по небесной сфере показывают стрелки. Вектор собственного движения – μ , прямое восхождение – α , склонение – δ , позиционный угол – θ . Источник: Медиафайлы на Викискладе

$$\mu = \sqrt{(\mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2},$$

которое, в свою очередь, связано с тангенциальной (т.е. поперек луча зрения) пространственной скоростью звезды простым соотношением

$$V_t = k\mu r.$$

Здесь V_t – тангенциальная скорость звезды в км/с, μ – полное собственное движение в мсд/год, r – расстояние в кпк, а $k = 4.738$ – множитель перехода раз-
мерностей из мсд/год/кпк в км/с (рис. 4).



Рис. 4. Связь пространственной скорости и собственного движения. Источник: dzen.ru

Собственные движения звезд по обычным меркам чрезвычайно малы и для большинства звезд составляют единицы миллисекунд дуги в год (порядка одной секунды дуги в столетие) (рис. 5). Однако есть и некоторые исключения, из которых самое известное – это звезда Барнарда, одна из ближайших звезд. Ее полное собственное движение превышает 10 угловых секунд в год. Однако эта звезда слаба, ее видимая звездная величина 9.5. Если бы все звезды имели такое собственное движение, то изменение звездной картины было бы известно еще в древние времена. С обычными соб-

ственными движениями картина звездного неба значимо меняется за десятки тысяч лет (рис. 6).

Зная собственные движения, можно вычислить координаты звезд на произвольную эпоху, пользуясь простыми соотношениями:

$$\alpha = \alpha_0 + \mu_\alpha (t - t_0),$$

$$\delta = \delta_0 + \mu_\delta (t - t_0).$$

Здесь α_0 , δ_0 – координаты звезды на эпоху наблюдения каталога, а $(t - t_0)$ – разность между желаемой эпохой и эпохой наблюдения. Следует учесть, что поскольку собственные движения содержат ошибки, то точность получаемых координат на далекие эпохи будет ниже (порой значительно), чем точность исходных координат α_0 , δ_0 .

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ НАЗЕМНЫМИ СПОСОБАМИ

Для определения собственных движений наземными способами используются два разных подхода.

Первый подход – фундаментальный. Координаты звезд определяются независимо друг от друга с помощью пассажных инструментов (прямое восхождение) и меридианных кругов (склонение) (рис. 7). Данные многих наблюдательных каталогов объединяются, обрабатываются с помощью достаточно сложных математических методов, учитывающих многие эффекты, искажающие координаты: атмосферную рефракцию, прецессию и нутацию. В таких каталогах, называемых фундаментальными, координаты и собственные движения разных звезд получены независимо друг от друга. Это не значит, что в них нет ошибок. Присутствуют случайные и систематические ошибки, вызван-

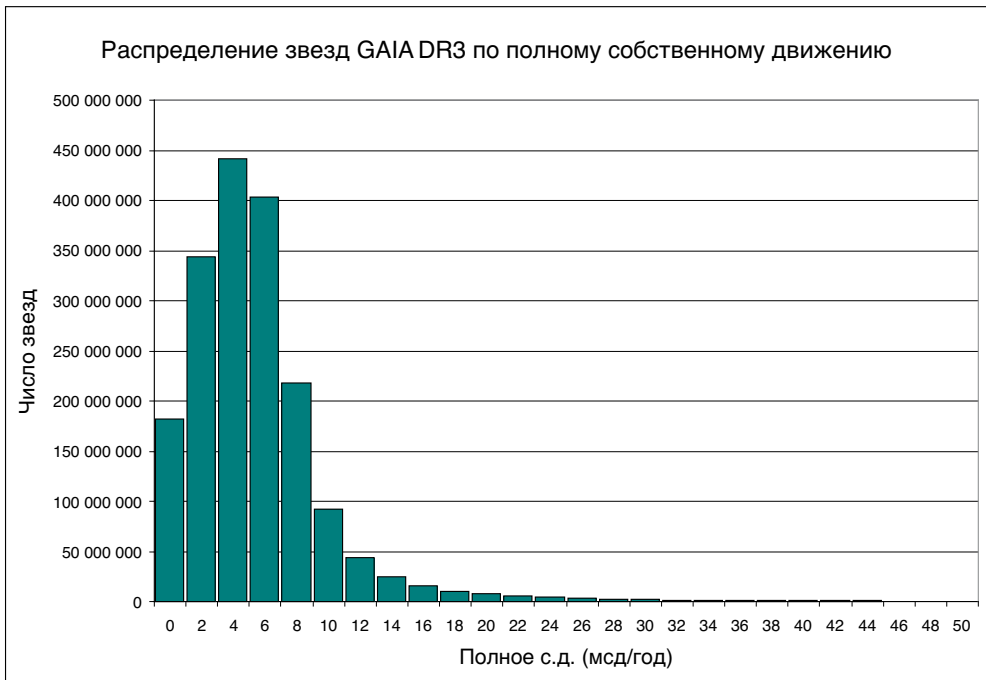


Рис. 5. Распределение звезд космического каталога Gaia по полному собственному движению. Рисунок автора

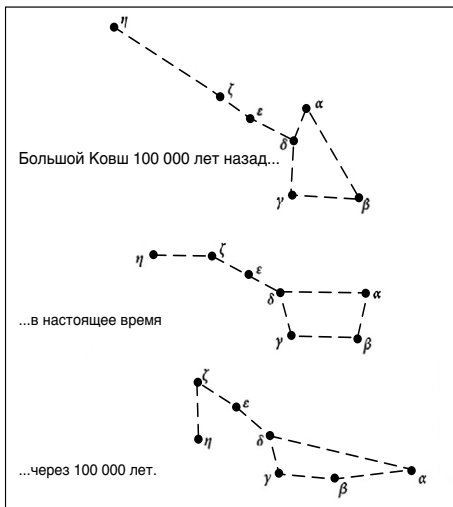


Рис. 6. Изменение вида «ковша» Большой Медведицы за 100 тыс. лет в прошлом и будущем. Из открытых источников в Интернете

ные разными причинами: например, атмосферной турбулентностью, гнутием трубы инструмента. Очень часто в наблюдениях есть ошибки, связанные с так называемым «уравнением яркости», из-за которого в определении координат ярких и слабых звезд наличествуют систематические различия. За почти двухсотлетнюю историю создания фундаментальных каталогов были разработаны многочисленные методы уменьшения влияния этих ошибок. К таким высокоточным каталогам собственных движений относятся каталоги серии FK (Fricke, 1988) – такие каталоги содержат относительно небольшое число звезд. Например, каталог FK5 содержит всего 1535 высокоточных звезд и еще 3117 звезд в приложении, точность определения координат и собственных движений которых хуже, чем в основном каталоге.

Второй подход – относительные наблюдения. Это прежде всего фотографические (в настоящее время ПЗС) наблюдения. Принцип наблюдения заключается в определении координат звезд относительно фундаментальных звезд. Этот метод значительно проще в использовании и позволяет построить каталоги, содержащие миллионы звезд. Однако ошибки, присутствующие в определении координат фундаментальных звезд, проникают во все определяемые звезды. К таким каталогам относится, например, каталог PPM (Roeser, 1988), распространивший систему FK5 на 400 тыс. звезд.

Современные массовые каталоги собственных движений звезд, такие как UCAC4 (Zacharias, 2013), PPMXL (Roeser, 2010), содержат сотни миллионов звезд. Они получены путем комбинаций различных наземных фотографических каталогов с достаточно большим временным базисом, что позволило получить высокоточные собственные движения для такого большого количества звезд.

Особый интерес именно в получении собственных движений вызывает подход в определении координат звезд в разные

эпохи относительно галактик, которые так далеки от нас, что на современном уровне точности их собственные движения не могут быть замечены. Этот подход, примененный в построении каталога XPM (Fedorov, 2009), позволяет избавиться от ошибок в координатах фундаментальных звезд. Но и здесь есть трудности: так как галактики – протяженные источники, то возникает вопрос, относительно каких участков удаленной галактики производить измерения.

ПОЛУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Миссия Hipparcos (ESA. The Hipparcos and Tycho Catalogues, 1997) открыла новую эру в массовом определении высокоточных собственных движений. Еще не завершенная программа Gaia (ESA. Gaia Science Community) переняла эстафету, и в третьем релизе каталог содержит свыше полутора миллиардов звезд с данными о собственных движениях (рис. 8). Координаты звезд на этих аппаратах получались особым способом. Исходным материалом для построения каталога являлись угловые расстояния между разными звездами. Проводились миллиарды измерений длин дуг в определенные моменты времени, и потом в результате сложнейшей вычислительной процедуры, для выполнения которой был построен специальный компьютерный центр, был получен каталог, содержащий положения, параллаксы и собственные движения звезд. Временной базис космических каталогов не велик, но это обстоятельство компенсируется крайне высокой точностью измерений, которая составляет десятые и даже сотые доли миллисекунды дуги. Для того чтобы привести координаты и собственные движения звезд к фундаментальной системе ICRS (Arias, 1995), базирующейся

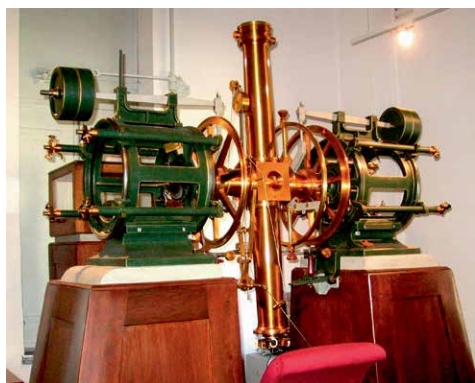


Рис. 7. Меридианный круг (обсерватории Куфнер, Вена, Австрия), используемый для определения склонений звезд. Источник: https://ru.wikipedia.org/wiki/Меридианный_круг

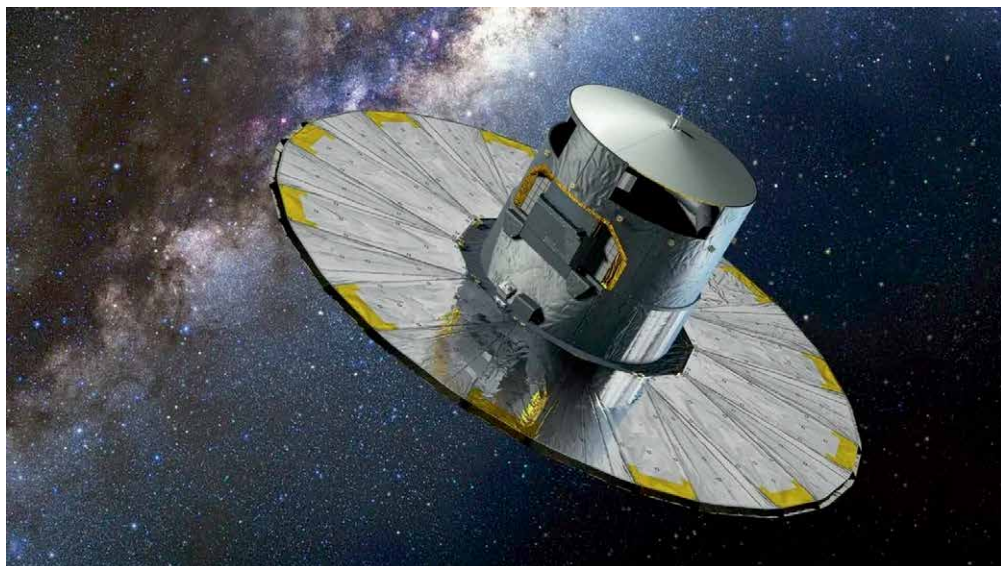


Рис. 8. Общий вид аппарата Gaia. Источник: ESA, Gaia mission

на «сфере неподвижных квазаров»¹, аппарат наблюдал в оптическом диапазоне удаленные источники, собственные движения которых практически равны нулю. В чем-то этот подход напоминает метод, используемый при построении каталога XPM. Точность собственных движений каталога Gaia DR3 составляет доли мсд/год (рис. 9). Ожидается, что в последующих выпусках точность будет улучшена по меньшей мере еще на порядок.

СЛУЧАЙНЫЕ И СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ В СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЯХ

Какова причина собственных движений звезд? Их можно условно разделить на две большие группы. В каждой звезде могут сочетаться все приведенные ниже факторы.

Первая группа – случайные составляющие в собственных движениях. Прежде всего это случайные ошибки, т.е. ошиб-

ки в определении координат в первую и вторую эпоху выльются в фиктивное собственное движение, не имеющее физической природы. Случайные ошибки – это значит такие ошибки, которые не имеют какого-либо систематического хода в зависимости от координат, блеска и иных характеристик звезды. Следует сказать, что разделение на случайную и систематическую составляющую в ошибках носит некоторый условный характер.

Вторая случайная причина – это пекулярные составляющие в скоростях звезд. Здесь можно привести аналог с облаком комаров, которое сдувается ветром. Все комары имеют общее движение по ветру, а также свою хаотичную скорость внутри облака. Так же и звезды: они имеют общее движение, связанное с движением потоков в Галактике, в то же время у каждой звезды имеется некая случайная скорость, которую часто и называют «пекулярной скоростью», т.е. особенной.

При анализе собственных движений случайная составляющая (и ошибки,

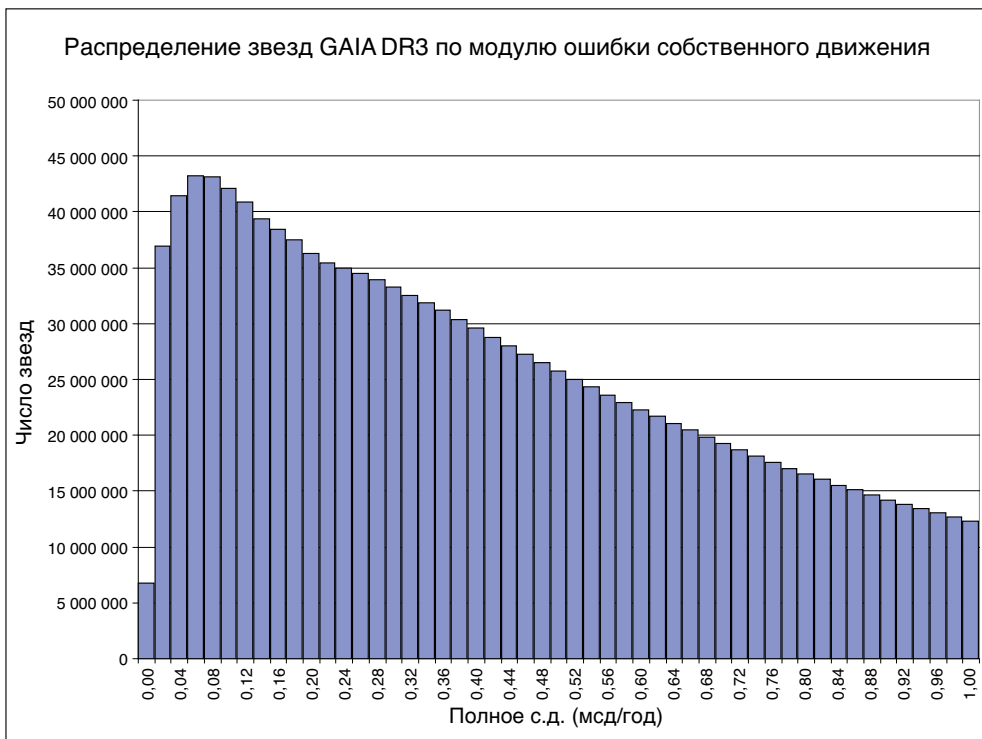


Рис. 9. Распределение звезд Gaia DR3 по ошибке полного собственного движения. Рисунок автора

и пекулярная скорость) мешают в получении результатов. Однако случайные компоненты могут быть легко исключены при массовых измерениях собственных движений и использовании массовых каталогов. Продолжая пример с комариным облаком, можно сказать, что, измеряя скорость каждого комара, мы получим сильно различающиеся значения для каждого, но, вычислив среднее арифметическое их скоростей, мы получим вполне надежно величину скорости ветра, который сносит всю тучу в одну сторону.

Вторая группа – систематические составляющие. Начнем опять с ошибок. Систематические ошибки в координатах и собственных движениях звезд, т.е. такие ошибки, которые являются функцией (неизвестной) от каких-либо характеристик звезды, – злейший враг

астрометристов и астрономов в целом. Их очень сложно обнаружить. Причина систематических ошибок может лежать в ошибках инструмента, с помощью которого производятся наблюдения. Например, деформация инструментов, более раннее определение прохождения звезды через меридиан или фокальную матрицу космического аппарата для ярких звезд. Такие ошибки могут быть замечены, если сравнивать каталоги, полученные на разных инструментах разными исследователями. Недаром в астрометрии такое большое внимание уделяется сравнению каталогов. Систематическое различие каталогов лишь указывает на наличие систематических ошибок, но не говорит, в каком каталоге они меньше! Систематические ошибки могут появляться и от неверной методики построения каталога.

И наконец, последняя причина систематических составляющих – это физические движения звезд. Их изучение является важной задачей звездной кинематики.

ЭФФЕКТЫ ДВИЖЕНИЯ СОЛНЦА В СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЯХ

Первым, кто попытался интерпретировать собственные движения звезд как отражение пекулярного движения Солнца, был Вильям Гершель. Действительно, если Солнце, подобно другим звездам, также обладает своей пекулярной скоростью относительно, как говорят, местного стандарта покоя, то при своем движении звезды перед ним будут «расступаться», а за ним «сходиться» (рис. 9). В 1783 г. Гершель воспользовался известными к тому времени собственными движениями всего 13 звезд. Он продолжил их собственные движения вдоль больших кругов, надеясь, что они пересекутся в одной точке (чего, конечно, не произошло). Но тем не менее Гершель обнаружил, что движение происходит по направлению к λ Геркулеса. Координаты апекса (точки, куда движется Солнце) он определил как $\alpha = 257^\circ$, $\delta = +25^\circ$ (современное значение $\alpha = 270^\circ$, $\delta = +30^\circ$).

Позже, с разработкой Ф. Гауссом математического метода наименьших квадратов в 1795 г. и выводом уравнений, описывающих влияние солнечного движения на собственные движения звезд русским ученым М. Ковальским, а затем английским ученым Дж. Эри в 1859 г., астрономы получили универсальный метод определения направления и скорости движения Солнца относительно произвольной группы звезд. Эти уравнения записывают обычно в галактической системе координат. Кстати, и в современных звездных каталогах часто для удобства указывают не только экваториальные координаты и собственные дви-

жения, но и галактические. В галактической системе координат за большой круг с галактической широтой 0° принимают плоскость Млечного Пути, нулевое значение долготы соответствует направлению на центр галактики. Формулы перехода из экваториальной системы в галактическую могут быть найдены в самых разных источниках.

Применив уравнения Эри–Ковальского для достаточно большой группы звезд (их параметры получены по данным Gaia), можно получить очень надежную оценку скорости Солнца относительно ближайших звезд.

Таблица 1. Принятые значения компонент солнечного движения [км/с], U , V , W – компоненты скорости Солнца вдоль осей X , Y , Z галактической системы координат

U	V	W
11.405 ± 0.010	21.644 ± 0.008	7.838 ± 0.006

ЭФФЕКТЫ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ

Проявление движения Солнца является самым значительным эффектом в собственных движениях. Но в начале XX в. стало заметно, что в собственных движениях присутствует еще одна сильная систематическая составляющая. В 1927 г. голландский астроном Ян Оорт, используя работы шведского астронома Бертиля Линдблада о вращении Галактики, вывел уравнения, носящие теперь их имя. (Ян Оорт известен еще также как автор гипотезы об источнике комет – облаке Оорта.) Так как зависимость угловой скорости вращения Галактики от расстояния от центра нам неизвестна, то в качестве рабочей гипотезы использовалось линейное приближение изменения угловой скорости в окрестности Солнца:

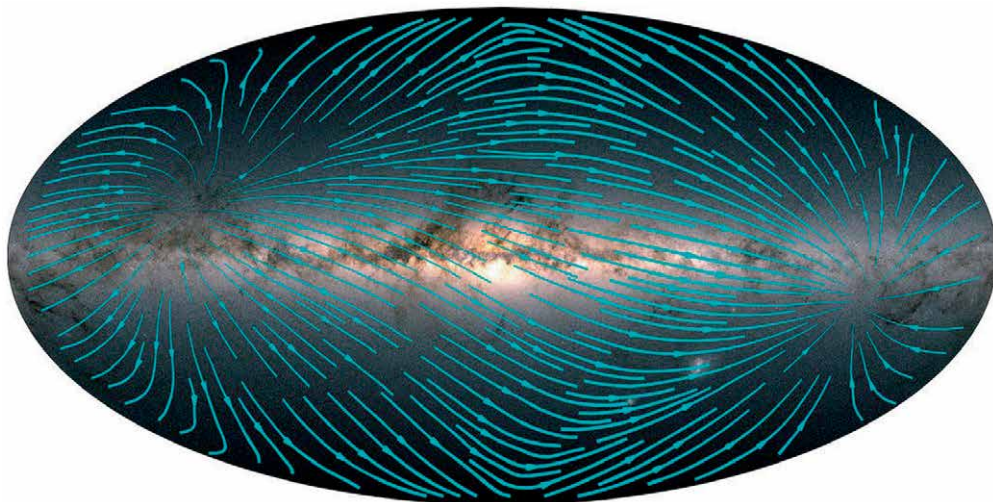


Рис. 9. Собственные движения, вызываемые движением Солнца

$$\Omega(R) = \Omega_0 + \left. \frac{\partial \Omega}{\partial R} \right|_0 (R - R_0).$$

Здесь:

Ω_0 – угловая скорость вращения Галактики на расстоянии Солнца от центра – R_0 ,
 Ω – угловая скорость вращения Галактики на расстоянии R ,

$\left. \frac{\partial \Omega}{\partial R} \right|_0$ – значение производной угловой скорости вращения Галактики в окрестности Солнца.

Период вращения Галактики в окрестности Солнца есть обратная величина к Ω_0 :

$$T_0 = \frac{1}{\Omega_0}.$$

Согласно данным по наблюдениям звезд (со звездной величиной 12^m) каталога Gaia DR3, период вращения Галактики равен 226.6 ± 1.5 млн лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели только основные эффекты. Собственные движения звезд

вызываются также и звездными потоками, эффектами Местной системы звезд, нелинейными эффектами вращения галактики и многим другим. Но это уже выходит за рамки нашей популярной статьи. Может быть, молодой читатель обратит внимание на этот замечательный и красивый раздел астрономии и свяжет свое будущее с активно развивающейся в последние годы астрометрией.

Литература

1. The Hipparcos and Tycho Catalogues: Astrometric and Photometric Star Catalogues Derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission / European Space Agency, FAST Consortium; ed. by M.A.C. Perryman. Noordwijk: ESA Publications Division, 1997 (ESA SP; vol. 1200).
2. ESA. Gaia Science Community. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>
3. Fricke W., Schwan H., Lederle T. Veroeff. Astron. Rechen-Institut Heidelb. Fifth Fundamental Catalogue (FK5), 1988. № 32.
4. Цветков А.С. Достижения современной астрометрии // Земля и Вселенная, 2021. № 3. С. 21–38.
5. Цветков А.С. От Земли до Вселенной: история определения расстояний // Земля и Вселенная, 2024. № 3. С. 29–48.