

PROPER MOTIONS
OF "FIXED" STARS
AND THEIR
SIGNIFICANCE
IN ASTRONOMY

A. A. KISELEV

The history of the discovery and observation of proper motions of stars is briefly described. Research programmes that concern an investigation of star motion kinematics are considered. The main achievements of this investigation are as follows: the solar motion in respect to nearby stars is determined, the differential rotation of the Galaxy is proved, the distances of remote star groups are estimated.

Кратко излагается история открытия собственных движений звезд и наблюдательных программ, связанных с исследованиями кинематики звездных движений. Главные результаты исследований: определено движение Солнца относительно ближайших звезд, установлено дифференциальное вращение Галактики, найдены расстояния до удаленных групп звезд на основе вековых и статистических параллаксов.

© Киселев А.А., 1997

**СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ
"НЕПОДВИЖНЫХ" ЗВЕЗД
И ИХ ЗНАЧЕНИЕ
В АСТРОНОМИИ**

А. А. КИСЕЛЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование инерциальной системы координат в астрономии

Открытие движений "неподвижных" звезд принадлежит знаменитому английскому астроному Эдмунду Галлею, обнаружившему в 1718 году, что 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 1/4 диаметра Луны к востоку. Замеченные изменения нельзя было приписать ошибкам каталога Птолемея, не превосходившим, как правило, 6' (1/5 диаметра Луны). Открытие Галлея вскоре (1728 год) было подтверждено другим английским астрономом, Джеймсом Брадлем, который известен более как первооткрыватель годичной аберрации звезд. В дальнейшем определениями движений звезд занимались Тобиас Майер (1723—1762), Никола Лакайль (1713—1762) и многие другие астрономы вплоть до Фридриха Бесселя (1784—1846), положившие начало современной фундаментальной системе положений звезд.

Любопытно, что потребовалось почти 2000 лет, чтобы разрушить сложившееся представление о неподвижных звездах, чтобы начать искать и найти движения звезд. Эта революция в астрономии конечно же произошла благодаря торжеству Ньютоновой механики, установившей законы движения небесных тел, включая звезды, о которых уже и в XVIII веке астрономы знали, что это тела, похожие на Солнце. Но главный интерес для астрономов того времени представляли Луна (для навигации), планеты и Земля как планета. Ньютонова механика создала условия для математически строгого изучения движений этих тел, оставалось только найти систему координат, которую можно было бы признать покоящейся или находящейся в состоянии равномерного прямолинейного движения, то есть инерциальную систему координат, удовлетворяющую первому закону Ньютона, такую систему координат, к которой легко и просто можно было бы отнести все наблюдаемые движения Луны, планет, и Земли в том числе. Такую систему координат, казалось бы, воплощали "неподвижные" звезды. И вот

астрономы начали определять сферические координаты звезд, относя их к экваториальной системе, где в качестве основной плоскости принимается плоскость, параллельная земному экватору, а началом отсчета долгот (прямых восхождений) служит точка весеннего равноденствия. Развитие инструментальной техники и мастерства наблюдателей (Дж. Брайден, Т. Майер) способствовало резкому улучшению точности определения координат звезд в экваториальной системе. На основе таких наблюдений были составлены первые каталоги положений некоторого числа избранных звезд. Точность положений звезд в этих каталогах уже в XVIII веке приближалась к $1''$, а в XIX веке еще заметно повысилась. Различие координат звезд в каталогах, составленных и отнесенных к различным эпохам, обнаружило, что принятая система экваториальных координат неинерциальна. Ньютонова механика позволила строго обосновать причины и характер изменений координат звезд, отнесенных к системе экваториальных координат — к системе отсчета, заданной свободным вращением Земли, обращаемой около Солнца и испытывающей возмущения со стороны Луны и планет. Эти изменения координат: 1) явление прецессии, которое было известно еще древним как “предварение равноденствий”; 2) явление нутации, которое было открыто Брайдемом. Оба эти явления вместе с абберацией были прослежены и подробно изучены несколькими поколениями астрономов в XVIII и XIX веках, начиная Брайдемом и кончая Бесселем. В итоге были надежно определены численные значения постоянных прецессии, нутации и абберации, то есть тех величин, которые и в настоящее время составляют часть в перечне так называемых фундаментальных постоянных астрономии. Таким образом, были созданы все условия для перехода от видимых (мгновенных) координат звезд к координатам, отнесенным к некоторой постоянной (остановленной) системе осей, которую с хорошим приближением можно считать инерциальной. На языке астрономов — небесных механиков — этот переход называется преобразованием от видимых положений звезд к их средним положениям в системе экватора и равноденствия заданной эпохи. Это преобразование было подробно обосновано и изложено в фундаментальной работе Бесселя “Fundamenta astronomiae” в 1818 году, которая до сих пор сохраняет свое значение. Обоснование инерциальной системы координат в астрономии создало необходимые условия для определения и исследований реальных движений небесных тел, в том числе и звезд, в окружающем Землю звездном мире.

СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД

Меридианные собственные движения

Собственным движением звезды в астрономии называют величины, характеризующие ее угловое

перемещение на небесной сфере в заданной системе координат за единицу времени. Если какая-либо звезда наблюдалась дважды в эпоху t_1 и эпоху t_2 и ее видимые координаты — прямое восхождение (AR) и склонение (Decl) — приведены в систему фундаментального каталога FK5 (эпоха T_0), то ее собственное движение определяется как

$$\mu_{AR} = \frac{(AR)_2 - (AR)_1}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

размерность — секунда времени в год,

$$\mu_{Decl} = \frac{(Decl)_2 - (Decl)_1}{t_2 - t_1},$$

размерность — угловая секунда в год.

Определенные таким способом собственные движения звезд иногда называют меридианными, так как они определяются в результате сравнения двух положений, полученных посредством наблюдений на меридианных кругах. Массовые определения меридианных собственных движений звезд стали возможными уже в XIX веке в результате создания нескольких десятков меридианных каталогов, приведенных к некоторой одной фундаментальной системе. Наибольшее число (33 342) положений и собственных движений звезд (в том числе слабых — до 9-й звездной величины) в одной системе приведено в известном общем каталоге “General Catalogue” Льюиса Босса (1910 год). Ошибки собственных движений в этом каталоге составляют $\pm(0,005-0,15)''/\text{год}$. К сожалению, положения и движения звезд несвободны от систематических ошибок. Новые фундаментальные каталоги звезд FK4 и FK5 сохраняют ошибки собственных движений на уровне $\pm(0,002-0,005)''/\text{год}$, однако эти каталоги охватывают лишь небольшое число избранных, в основном ярких звезд. К 1995 году было известно не менее 50 000 меридианных собственных движений звезд от самых ярких до 9-й звездной величины. Ошибки этих собственных движений могут быть от $\pm 0,002''$ до $\pm 0,010''$ в зависимости от продолжительности истории наблюдений. По величине большинство известных собственных движений меньше $0,050''/\text{год}$, однако встречаются и большие собственные движения до $10''/\text{год}$ (звезда Барнарда), которыми обладают, как правило, ближайшие к Солнцу звезды в соответствии с геометрическим условием

$$\mu'' = \frac{1}{4,74 D} V_t. \quad (2)$$

Здесь V_t — проекция на небесную сферу пространственной скорости звезды в системе координат, движущейся вместе с Солнцем, D — расстояние до звезды в парсеках (1 пк = 206 265 астрономических единиц = 3,26 световых лет). Размерность V_t — км/с, размерность μ'' — угловая секунда в год. В соответствии с (2) у ярких близких к Солнцу звезд Сириус

($D = 2,7$ пк, $V_t = 17$ км/с) и Арктур ($D = 11,1$ пк, $V_t = 120$ км/с) обнаружены такие собственные движения: $\mu = 1,315''$ (Сириус) и $\mu = 2,287''$ (Арктур), достаточно большие, чтобы невооруженным глазом заметить смещение этих звезд относительно других за 2000 лет, прошедших со времен Гиппарха.

Фотографические собственные движения звезд

В конце прошлого века в практику наблюдательной астрономии прочно внедрилась фотография. Существенно возросли проникающая сила телескопов и информативность наблюдений. Появилась реальная возможность определять миллионы собственных движений звезд, включая самые слабые (до 21-й звездной величины). Международная астрономическая общественность согласовала несколько кооперативных проектов фотографических наблюдений всего неба.

Первый проект – каталог “Карта неба” (“Carte du Ciel”) был принят по инициативе астрономов Парижской обсерватории в 1887 году (адмирал Мушэ). Этот проект предусматривал фотографирование с двукратным перекрытием всего неба с помощью астрографов братьев Анри ($D = 230$ мм, $F = 3460$ мм, поле $2^\circ \times 2^\circ$). Он был выполнен только к 1938 году. Фотопластинки (около 20 000) были измерены и хранятся на 23 обсерваториях в разных странах. Опубликованы измеренные координаты около трех миллионов звезд до 12-й звездной величины. Каталог “Карта неба” в настоящее время приобрел особую ценность как документ, свидетельствующий об относительных положениях звезд до 12-й звездной величины по всему небу в эпоху, близкую к 1900 году. Этот каталог широко используется для определения фотографических собственных движений звезд с большой точностью – до $\pm(0,003-0,006)''/\text{год}$ при разности эпох порядка 100 лет.

Второй проект принадлежит известному голландскому астроному Я. Каптейну (1906 год), предложившему фотографировать на длиннофокусных инструментах с максимальной экспозицией небольшие площадки от $1^\circ \times 1^\circ$ до $2^\circ \times 2^\circ$, равномерно распределенные по всему небу (всего 206 площадок). Предполагалось, что предельная величина звезд в площадях Каптейна составит 15–18 звездных величин. По каждой из площадок Каптейна было необходимо получить максимум информации о величинах звезд, их цветах, спектрах и, конечно, о собственных движениях. Научная задача плана Каптейна – исследование структур, кинематики и динамики звездного населения нашей Галактики. План Каптейна был в основном выполнен. Во всяком случае кинематическая часть плана была обеспечена двумя превосходными каталогами собственных движений звезд в площадях Каптейна, созданных благодаря усилиям астрономов Радклифской (Х. Нокс-Шоу и Х. Скот-Баррет, 1934 год) и Пулковской (А.Н. Дейч, 1940 год) обсерваторий.

По поводу фотографических собственных движений звезд необходимо сделать несколько важных замечаний.

1. Фотографические собственные движения звезд определяются сравнением измеренных положений звезд на различных пластинках, полученных в разные эпохи. В силу этого фотографические собственные движения неизбежно остаются относительно некоторой группы других звезд (так называемых опорных звезд), о движении которых делаются более или менее правдоподобные предположения. Таким образом, чтобы перейти от фотографических собственных движений звезд к меридианным (имеющим смысл инерциальных или “абсолютных”), необходимо выполнить дополнительное исследование, которое астрономы иногда называют абсолютизацией и которое редко бывает безупречным.

2. Главное достоинство фотографических собственных движений в их относительно высокой точности и массовости в отношении самых слабых звезд. Это обстоятельство делает их незаменимым наблюдательным материалом при статистических исследованиях, связанных с определением дисперсий пекулярных (индивидуальных) движений звезд и распределением движений звезд, отнесенных к разным типам звездного населения.

3. Существенным недостатком фотографических собственных движений звезд является их несвобода от разного рода систематических ошибок, связанных с фотографическим методом наблюдений. Это так называемые ошибки “уравнения блеска”, “уравнения цвета” и некоторые другие, связанные с несовершенством оптики широкоугольных телескопов, применяемых в астрофотографии. Перечисленные ошибки выражаются в систематическом смещении изображений звезд на пластинке в зависимости от яркости, цвета звезд и их положения на пластинке. Эти ошибки трудно калибруются, так как они зависят еще от постоянно изменяющихся условий наблюдений (прозрачности атмосферы, ветра, качества изображений).

Третий проект, предложенный международному астрономическому сообществу, в значительной мере связан с попыткой преодолеть трудности установления системы фотографических собственных движений (см. замечание 1) и, напротив, использовать все преимущества, вытекающие из их массовости (см. замечание 2).

Идея этого проекта была одновременно высказана в 30-х годах американским астрономом Райтом и Б.В. Нумеровым в СССР. Согласно этой идее, предлагалось определять фотографические собственные движения звезд непосредственно относительно внегалактических туманностей (галактик). Американцы предполагали использовать изображения галактик в качестве опорных звезд, советские

астрономы — лишь в качестве контрольных звезд в процессе абсолютизации. Ввиду крайней удаленности галактик (большинство наблюдаемых галактик удалены от нашей Галактики более чем на 10^6 пк) можно пренебречь их собственными движениями, значительно меньшими, чем $0,001''/\text{год}$. Поэтому фотографические собственные движения звезд, определенные относительно галактик, можно считать абсолютными и из сравнения с меридианными собственными движениями тех же звезд проверить, удовлетворяют ли меридианные собственные движения звезд условию инерциальности, то есть правильно ли они выведены.

Таким образом, идея определения собственных движений звезд относительно галактик отражала стремление астрономов найти систему инерциальных координат на небе, независимую от данных теории вращения Земли. К сожалению, выполнение этого грандиозного проекта задержалось в связи с началом второй мировой войны. Наблюдения согласно плану начались только в 50-х годах. Советскую программу наблюдений возглавил пулковский астроном А.Н. Дейч, американскую программу — астроном С. Василевскис из Ликской обсерватории. К настоящему времени наблюдения обеих программ практически закончились. Предварительные результаты показывают, что нет существенных различий между инерциальными системами, установленными посредством привязки к галактикам и на основе теории вращения Земли.

ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗВЕЗД

В итоге выполнения трех международных программ фотографических наблюдений всего неба, а также других работ известно более миллиона собственных движений звезд, причем для звезд до 9-й величины список их собственных движений практически исчерпан. На основе этих наблюдательных данных выполнены многочисленные исследования движений звезд в окрестностях Солнца, а также кинематики и динамики нашей Галактики. Отметим следующие важнейшие результаты.

1. Установлено, что Солнце движется по отношению к ближайшим звездам со скоростью 20 км/с в направлении апекса — точки на небесной сфере с координатами $AR = 18^{\text{h}}00^{\text{m}}$, $Decl = +30^\circ$ (около звезды 4-й величины ξ Herculis). По отношению к другим, более далеким звездам Солнце движется немного быстрее и изменяет направление в сторону больших AR .

2. Все звезды в окрестностях Солнца обладают параллактическим движением, отражающим факт движения Солнца. Это параллактическое движение, так называемый вековой параллакс, звезды может служить мерой расстояния звезды от Солнца.

Расстояния до многих звезд в Галактике определены с помощью вековых параллакс.

3. Установлен факт дифференциального вращения Галактики. Солнце находится на расстоянии 10 кпк от центра Галактики и вместе с другими ближайшими звездами принимает участие во вращении Галактики. Скорость этого вращения около 250 км/с , угловая скорость обращения $0,0053''/\text{год}$, период обращения порядка 230 млн лет. Части Галактики, находящиеся ближе к ее ядру в центре, обращаются быстрее, а части на периферии — медленнее.

4. Все звезды в Галактике кроме общего переносного движения обладают еще индивидуальным, так называемым пекулярным движением. Движение Солнца в направлении созвездия Hercules есть пекулярное движение, а движение в направлении Cygni — переносное, общее с другими ближайшими звездами, обращающимися около ядра Галактики. Величина дисперсии пекулярных скоростей звезд представляет собой характерный динамический параметр однородной группы звезд. Чем массивнее звезды (звезды-гиганты классов O, B, F, M), тем меньше дисперсии скоростей, напротив, у звезд малых масс (карлики G, K, M) дисперсии больше. Из сравнения наблюдаемых дисперсий собственных движений (размерность — $''/\text{год}$) какой-нибудь однородной группы звезд и дисперсий их лучевых скоростей (размерность — км/с) можно получить надежные оценки расстояния, так называемый средний (статистический) параллакс до исследуемой группы звезд. На основе вековых и средних параллакс звезд составлены основные геометрические и кинематические представления о Галактике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования собственных движений звезд лежат в основе наших знаний о звездном мире, к которому принадлежит наше Солнце. Успехи звездной астрономии, начатые трудами знаменитых астрономов XVIII и XIX веков Брайля, Гершеля, Бесселя, Струве, не были бы столь значительны, если бы “неподвижные” звезды не обладали собственными движениями.

* * *

Алексей Алексеевич Киселев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, ведущий научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН. Область научных интересов: звездная астрономия, кинематика и динамика двойных звезд, фотографическая астрометрия. Автор одной монографии и 100 других научных работ.