

ДОСТИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ АСТРОМЕТРИИ

© 2021 г. А. С. Цветков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.s.tsvetkov@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.08.2020 г.

После доработки 01.09.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Астрометрия — основа астрономических наблюдений и измерений координат и времени. Главная её задача — реализация системы отсчёта — той самой, о которой говорится в первом законе Ньютона. Ещё с античных времён астрономы создавали для этой цели звёздные каталоги. Работа над ними привела к открытию прецессии и нутации земной оси, собственных движений и параллаксов звёзд, орбитального движения двойных звезд. На наблюдениях в радио- и оптическом диапазоне очень далёких объектов — квазаров — базируется современная система отсчёта International Celestial Reference Frame (ICRF). Именно к ним привязывается система GPS или ГЛОНАСС в навигаторе. XXI век с его вычислительными возможностями привёл к созданию звёздных каталогов невиданной мощности, содержащих свыше миллиарда объектов. Но основной прорыв, даже революцию в астрометрии совершили космические наблюдения. Уже два космических аппарата создали звёздные каталоги фантастической точности, что позволяет прикоснуться к решению таких задач, постановка которых ещё несколько лет назад была немыслима. Обзору успехов астрометрии за последние два тысячелетия, массовым звёздным каталогам и космическим астрометрическим проектам посвящена эта статья.

Ключевые слова: астрометрия, радиоастрометрия, каталоги Hipparcos, NOMAD, UCAC4, PPMXL, XPM, космическая миссия GAIA.

DOI: 10.31857/S0869587321020109

Если звёзды заносят в каталоги — значит, это кому-то нужно!

ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

Астрометрия — самая древняя часть астрономии. Её основной метод — позиционные измерения, то есть измерение точных направлений на объекты, к которым в первую очередь относятся звёзды. С античных времён результаты таких наблюдений оформлялись в виде звёздных ка-

талогов. Наиболее известный среди них, не сохранившийся до наших дней, — каталог древнегреческого астронома Гиппарха (II в. до н.э.), датированный 129 г. до н.э. В 2005 г. исследователи сделали предположение, что он присутствует на римской статуе “Атлант Фарнезе” (рис. 1) [1]. Надо признать, что этот каталог был далеко не первым. Известно, что Гиппарх, сравнив положения звёзд в своём каталоге с более ранними каталожными данными, открыл явление астрономической прецессии, природу которой смог объяснить в 1686 г. Исаак Ньютон.

Астрономические каталоги бывают разными — туманностей, галактик, переменных звёзд и т.п. Их называют астрофизическими. Но нас интересуют астрометрические каталоги. Данные, которые обычно содержатся в них, отражены в таблице 1.

Положения и собственные движения звёзд — точные координаты и скорости их изменения —



ЦВЕТКОВ Александр Станиславович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии СПбГУ.

нужны для построения системы отсчёта на небесной сфере. Существует абстрактное понятие Reference System (система отсчёта), подразумевающее теоретическое построение, и конкретное Reference Frame, означающее реализацию системы отсчёта на практике [2]. Наиболее точным воплощением абстрактной инерциальной системы отсчёта как раз и служат звёздные каталоги. Именно к ним привязывают координаты различных объектов на небесной сфере и, в конечном итоге, на Земле. Всем известная система GPS/ГЛОНАСС прикреплена через космические аппараты к каталогу квазаров — сверхдалёких объектов, собственными движениями которых можно пренебречь [3].

Собственные движения звёзд (proper motions) — это скорости изменения звёздных координат. Зная их, можно перевести координаты звёзд на другую эпоху как вперёд, так и назад. Анализ самих собственных движений позволяет изучать кинематику звёзд околосолнечного пространства и Галактики в целом. Открытие собственных движений принадлежит знаменитому английскому астроному Эдмунду Галлею, обнаружившему в 1718 г., что некоторые яркие звёзды из каталога Гиппарха—Птолемея заметно изменили свои положения среди других светил [4].

Крайне сложно и драматично решался вопрос о расстояниях до звёзд. Попытки обнаружить их параллактические смещения, вызванные обращением Земли вокруг Солнца, предпринимались ещё в античности. Их отсутствие (конечно же, вызванное чрезвычайной малостью эффекта) служило одним из аргументов против гелиоцен-



Рис. 1. Эллинистическая скульптура “Атлант Фарнезе”. II в. н. э. Национальный археологический музей Неаполя

трической системы мира. Поиском параллакс в Новое время занимались такие видные учёные, как Тихо Браге, Галилео Галилей, Роберт Гук. В ходе этой работы Джеймс Бредли обнаружил в 1728 г. абerrацию света и нутацию земной оси, а

Таблица 1. Данные астрометрических каталогов

Данные	Комментарий
Положения (координаты)	Всегда присутствуют, могут быть в экваториальной и/или галактической системе координат; приводятся на конкретную эпоху наблюдений
Собственные движения	Изменения координат со временем; практически всегда присутствуют в современных звёздных каталогах
Параллаксы	Расстояния до звёзд; присутствуют в специальных каталогах и каталогах космической астрометрии
Звёздные величины	Блеск звёзд в одной или в нескольких общепринятых шкалах; хотя это величина астрофизическая, но существует практически всегда
Информация о кратности	Часто приводится, указывая на особенности в астрометрических данных
Номера звёзд по другим каталогам	Полезная информация, позволяющая объединять и сравнивать данные различных каталогов
Дополнительная информация	Различные данные обычно астрофизического характера, полученные, как правило, из других каталогов, например, лучевые скорости — скорости звезды вдоль луча зрения, установленные по спектральным измерениям

Таблица 2. Расстояния и углы, под которыми будет видна рублёвая монета диаметром 2 см

Расстояние	Угол
4 км	1"
40 км	0.1" – параллаксы ближайших звёзд
4000 км (Москва–Лиссабон)	0.001" или 1 мсд – точность Hipparcos
400000 (Земля–Луна)	0.01 мсд – точность GAIA

Уильям Гершель в 1804 г. – орбитальное движение у двойных звёзд [5].

Лишь в 1837 г. В.Я. Струве в Дерптской обсерватории, а 1838 г. Фридрих Бессель в Кёнигсбергской обсерватории и Томас Хендерсон в обсерватории мыса Доброй Надежды провели первые достоверные оценки параллаксов ближайших звёзд, которые составили лишь доли секунды дуги [6]. Так, параллакс Альтаира у Струве оказался равным $0.181'' \pm 0.094''$. Для более наглядного представления малости измеряемых углов можно воспользоваться таблицей 2.

Определение тригонометрических параллаксов, то есть расстояний до звёзд, полученных геометрическим методом, посредством наземных наблюдений – крайне трудоёмкое занятие. Земная атмосфера ставит предел при наблюдении малых углов. Предельно достижимые статистические точности наземных наблюдений в большинстве своём ограничены значением $0.05''$, что даёт ошибку в определении параллакса в 100% уже на расстоянии 20 пк. Всё это привело к тому, что с 1838 по 1991 г. были измерены параллаксы лишь 8000 звёзд, притом с большой неопределённостью [7]. Не следует путать тригонометрический параллакс звёзд с так называемыми фотометрическим и спектральным. Под последними подразумевают косвенные оценки расстояний до звёзд по их астрофизическим характеристикам. Но для того чтобы это сделать, необходимо определить истинным тригонометрическим способом расстояния до звёзд тех или иных типов. В дальнейшем эта информация может быть использована для вычисления расстояния до звёзд, тригонометрический параллакс которых недостижим для измерений.

ЭПОХА НАЗЕМНЫХ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Последним каталогом дотелескопической эпохи следует считать каталог, созданный в 1570–1600 гг. одним из лучших наблюдателей Тихо Браге [8]. Точность его положений составляет около 1 мин дуги. Именно этот каталог позволил Иоганну Кеплеру вывести свои знамени-

тые законы, которые привели к открытию Исааком Ньютоном закона всемирного тяготения.

XVIII–XIX столетия характеризуются постепенным увеличением точности наблюдений, достигшей к середине XX в. порядка $0.1''$. Последний каталог знаменитой серии FK (The Catalogues of Fundamental Stars) FK5 Basic [9] содержал всего 1535 звёзд, положения и собственные движения которых были уже на пределе точности наземных наблюдений, а история их слежения насчитывала более столетия. Каталоги этой серии (FK3, FK4, FK5) многие десятилетия задавали фундаментальную систему координат. Методика наблюдений была построена таким образом, что координаты каждой звезды в них определялись индивидуально, независимо друг от друга. Этим и вызвано столь небольшое число звёзд в фундаментальных каталогах.

Для распространения систем на большее число звёзд использовались фотографические каталоги, например, PPM (Position and Proper Motions) [10], содержащий около 400 тыс. звёзд, но со значительно меньшей точностью. Такие каталоги назывались относительными. Ошибки определения фундаментальной системы проникали в каталоги-распространители.

Бурно развивающаяся астрофизика требовала от астрометрии прежде всего высокоточных расстояний (рис. 2). В астрофизике известен фотометрический метод определения расстояний, использующий зависимость период–светимость для переменных звёзд-цефеид. Однако для калибровки этой шкалы необходимо промерить расстояние до нескольких цефеид прямым тригонометрическим методом. Расстояние до ближайшей к нам цефеиды – Полярной звезды – составляет, по данным космической астрометрии, 137 пк. Измерение тригонометрического параллакса с поверхности Земли для Полярной уже практически невозможно. Остальные цефеиды находятся ещё дальше. Определение расстояний до ближайших галактик основано на шкале цефеид. Дальнейшие косвенные методы позволяют определить расстояния до далёких скоплений галактик и определить значение постоянной Хаббла и возраст Вселенной. Но для уверенного их определения следует откалибровать зависимость период–

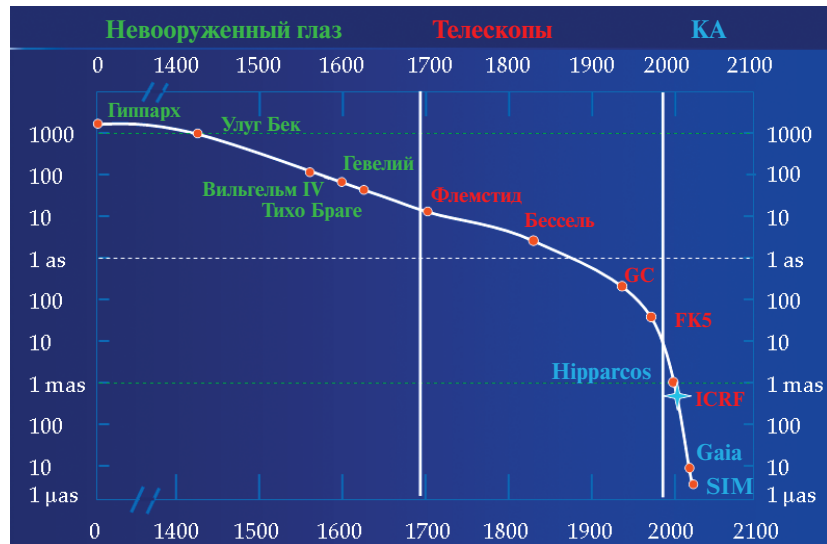


Рис. 2. Динамика точности астрономических наблюдений

светимость прямым методом. Этого наземная астрометрия сделать уже не могла [11].

РАДИОАСТРОМЕТРИЯ

Параллельно с оптическими наблюдениями развивалась радиоастрономия, которая с появлением радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ, VLBI) привела к резкому увеличению точности наблюдений вплоть до $0.001''$ [12].

В простейшем случае радиоинтерферометр — это система из двух радиотелескопов, ведущих синхронные наблюдения одного и того же точечного радиоисточника. Этот прибор измеряет временную задержку прихода фронта волны радиоизлучения на один телескоп по сравнению с другим. При небольших базах радиотелескопы можно соединить непосредственно линиями связи. Но если они расположены на расстояниях несколько тысяч километров друг от друга, а порой и на разных материках, то необходимо использовать точные стандарты времени, задаваемые атомными часами. Анализ измерения временных задержек позволяет получить географические координаты радиотелескопов, небесные координаты наблюдаемых радиоисточников, а также тонкие эффекты во вращении Земли — движение полюсов в её теле и неравномерность вращения. Точность этих измерений определяется длиной базы интерферометра, то есть расстоянием между телескопами и длиной волны принимаемого радиоизлучения. В 1970–1990 гг. во всём мире развернулись работы по созданию радиоинтерферометрических сетей, с помощью которых удалось достичь точности позиционных наблюдений квазаров порядка $0.001''$ – $0.0005''$ [13]. В нашей стране такие работы ведутся в рамках проекта “Квазар”,

для осуществления которого в Санкт-Петербурге был создан Институт прикладной астрономии РАН [14]. В действующую сеть входят радиоастрономические обсерватории “Светлое”, “Зеленчукская”, “Бадары” и Центр управления, сбора и обработки данных. Всё это позволило создать систему отсчёта принципиально нового типа — с использованием вместо звёзд квазаров, координаты которых были получены на миллисекундном уровне точности.

Как известно, квазары — это космологические объекты, удалённые от нас на предельные расстояния. Даже если предположить нереально высокие скорости их поперечного движения, сопоставимые со скоростью света, то и в этом случае трудно заметить их собственные движения. Таким образом, квазары образуют “сферу неподвижных звёзд”, которую можно использовать в качестве системы отсчёта. Однако не все квазары подходят для её построения. Некоторые имеют переменную структуру, вызванную физическими процессами внутри них, что приводит к смещению центра радиоизображения. Поэтому для построения системы отсчёта было выбрано 667 спокойных радиоисточников, из них 212 с ошибкой определения положения всего $0.0004''$. Новая радиоастрометрическая система отсчёта позволила на более высоком уровне изучать явления, происходящие на Земле: особенности её вращения, движение материков, тектонику плит. Однако радиоастрономия имеет существенный недостаток — недоступность в оптике. И если для GPS/ГЛОНАСС это не имеет особого значения, то для оптических наблюдений создаёт существенные проблемы. Данный недостаток удалось преодолеть только методами космической астрометрии, то есть про-



Рис. 3. Радиотелескоп сети “Квazar” в Бадарах

ведением астрометрических измерений в оптическом диапазоне в космосе.

ПЕРВЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АСТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ HIPPARCOS

В 1989 г. Европейское космическое агентство (ESA) осуществило запуск космического аппарата Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite – спутник для сбора высокоточных параллаксов) с целью получения положений, собственных движений и параллаксов звёзд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звёзд по заданной программе [15].

Обработка этих наблюдений привела к созданию двух каталогов: Hipparcos, содержащего информацию о 118 218 звёздах с точностью определения положений, годовых собственных движений и параллаксов на уровне 1 mas (milli arc second – миллисекунда дуги; в русскоязычной литературе используется сокращение мсд – миллисекунда дуги), и каталога Tycho (свыше 1 млн звёзд) с точностью измерения положений и собственных движений звёзд до 25 mas [16, 17]. Данных о параллаксах этот каталог не содержит.

Положения и собственные движения звёзд в каталогах Hipparcos и Tycho приводятся в фундаментальной системе ICRS (International Celestial Reference System), реализованной в настоящее время с помощью каталога внегалактических радиоисточников ICRF (International Celestial Refer-

ence Frame) [18]. Вследствие того, что внегалактические источники (квазары) были недоступны прямому наблюдению на аппарате Hipparcos (за исключением 3С 273), пришлось использовать несколько прямых и косвенных методов, чтобы связать предварительную систему каталога Hipparcos с ICRF.

Появление Hipparcos вызвало бум статей разной направленности. Перечислим кратко некоторые основные результаты, изложенные в них (подробнее – в материалах симпозиума Hipparcos Venice’97 [19]):

- разработка самой технологии космических астрометрических наблюдений, связывание космической системы отсчёта с наземной, создание программных продуктов, использующих данные Hipparcos и Tycho, обеспечение доступа астрономической общественности к результатам космической миссии;
- калибровка диаграммы Герцшпрунга–Рассела светимости переменных звёзд разных типов (цефеиды, мириды), определение абсолютных звёздных величин, измерение масс компонентов двойных звёзд;
- исследование кинематики звёзд околосолнечного пространства, изучение структуры звёздных ассоциаций, поиск движущихся скоплений, распределение тёмной материи в Галактике;
- калибровка шкалы межгалактических расстояний, определение абсолютных возрастов шаровых звёздных скоплений.

Следует отметить, что успех миссии Hipparcos связан прежде всего с определением тригономет-

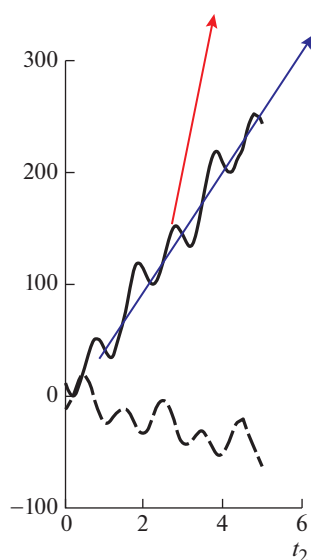


Рис. 4. “Мгновенные” собственные движения звёзд

рических расстояний 100 тыс. звёзд на уровне 1 мсд, что даёт точность в 20% до расстояний в 200 пк и 50% — до расстояний 400 пк. Однако для объектов, находящихся на расстоянии 1 кпк и далее, точность Hipparcos недостаточна.

Собственные движения звёзд, полученные на аппарате, как оказалась, имеют свои особенности, которые не проявляются при наземных наблюдениях. При определении собственного движения звезды традиционными методами разность эпох составляет обычно не менее 30 лет, а то и больше. Относительно низкая точность наземных наблюдений компенсируется большой разностью эпох. В Hipparcos эта разность составляет всего 3 года. Можно сказать, что собственные движения звёзд, полученные на таком кратком сроке, — мгновенные. Довольно часто звезда имеет невидимый (или не регистрируемый на аппарате) спутник. Из-за обращения компонентов вокруг общего центра тяжести могут возникнуть различия собственного движения звезды, определённого наземным способом (голубая стрелка на рисунке 4), по сравнению с космическим (красная стрелка)¹. Сравнение собственных движений звёзд наземных каталогов с данными космических каталогов может помочь в поисках звёзд с тёмными спутниками.

На аппарате Hipparcos наблюдалось около 1 млн звёзд по небольшому числу раз (2–3 наблюдения за весь период). Эти сведения легли в основу каталога Tycho. Но надёжность данных первого каталога Tycho сразу же вызвала нарекания. По одному разу аппарат Hipparcos пронаблюдал око-

ло 3 млн объектов. Это обстоятельство подтолкнуло астрометристов к созданию Tycho-2 — каталога нового поколения [20]. Его новизна состояла в том, что для вывода собственных движений звёзд в качестве первых эпох были использованы обширные ряды наземных астрометрических наблюдений, а для вторых эпох — весь массив данных, собранный космическим аппаратом Hipparcos. В результате появился астрометрический каталог Tycho-2, содержащий положения и собственные движения звёзд с точностью около 2.5 мсд/год, а также двухполосную фотометрию 2.5 млн звёзд (рис. 5). Каталог включает объекты до звёздной величины 11.5^m [17]. Он сыграл большую роль в различных кинематических исследованиях и до появления релизов каталога GAIA считался лучшим по точности собственных движений звёзд.

Интересно, что в Гейдельбергском астрономическом институте выпустили очередной каталог серии FK — FK6, который представляет комбинацию данных FK5 и Hipparcos [21, 22].

МАССОВЫЕ АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ КАТАЛОГИ НАЧАЛА XXI ВЕКА

Если изначально точность положений звёзд в Hipparcos составляла на 1991 г. около 1 мсд, то за прошедшие 30 лет из-за ошибок в собственных движениях порядка 1 мсд/год она деградировала до 30 мсд. Вследствие этого возникла необходимость в новых наблюдениях и каталогах. Повсеместное внедрение компьютерных методов обработки, сопоставление разных наблюдательных каталогов привело в начале XXI в. к появлению массовых звёздных каталогов немыслимых ранее объёмов, содержащих около 1 млрд записей.

Первым массовым можно считать каталог NOMAD (The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset), включающий свыше 1 млрд объектов, который стал доступен астрономической обществу в 2004 г. [23]. В то время ещё были определённые технические сложности с хранением и обработкой данных такого объёма в обычной лаборатории или дома. В каталоге 1800 отдельных файлов, формат каждого параметра (координаты, собственные движения, звёздные характеристики) — бинарный целочисленный, что обеспечивает высокую скорость считывания. Тем не менее даже простейшая обработка NOMAD на современном персональном компьютере занимает свыше часа. Если необходимо решать такие задачи разово, то это приемлемо, а при постоянной работе с массивом данных следует подумать о системе распределённых вычислений. Сверхвысокая плотность звёзд в подобных каталогах позволяет выдвигать и решать задачи, постановка которых ранее была невозможна. Например, можно исследовать структуру всей Галактики в обшир-

¹ Рисунки в цветном формате в электронной версии статьи на сайте ИКЦ “Академкнига”.

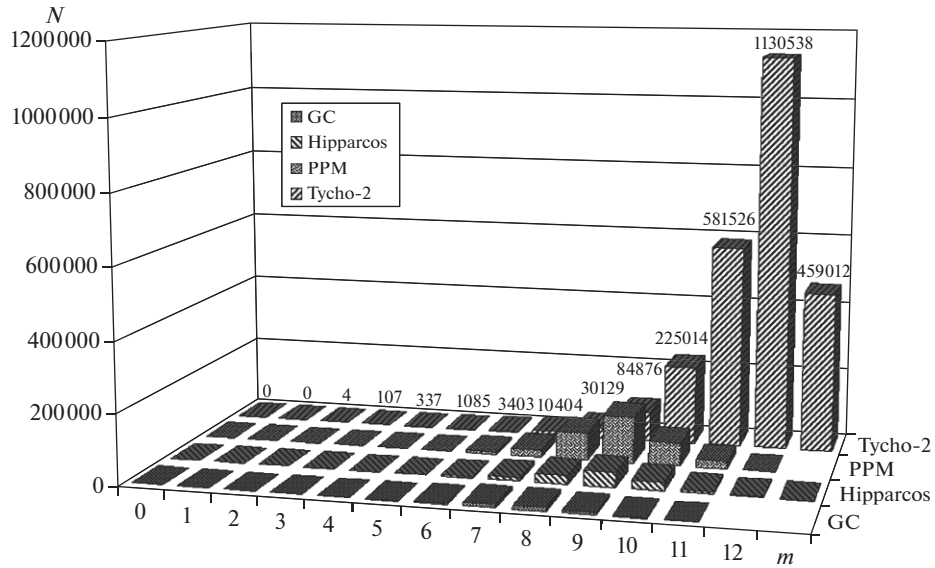


Рис. 5. Сравнение числа звёзд каталогов GC, Hipparcos, PPM и Tycho-2

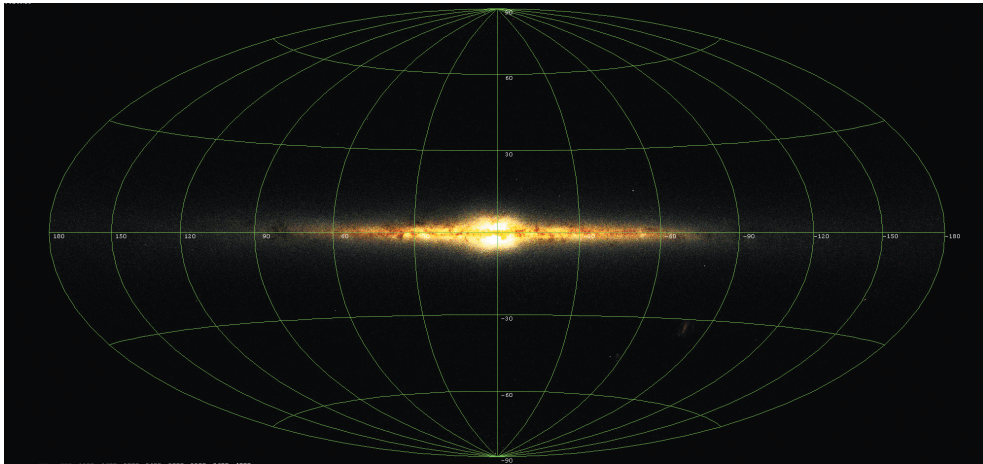


Рис. 6. Звёзды каталога NOMAD в проекции Хаммер-Айтоффа, визуализация инфракрасных звёздных величин в видимый диапазон

ных областях, а не в окосолнечном пространстве. На рисунке 6 показано распределение звёзд каталога NOMAD по небесной сфере в проекции Айтоффа [24]. Цвет звёзд подобран искусственно, путём сопоставления с инфракрасными звёздными величинами H , J , K_s цветовых компонент RGB-модели. Изображение на рисунке 6 вызывает иллюзию, что мы рассматриваем нашу Галактику откуда-то со стороны. На самом деле это изображение Млечного Пути на небесной сфере в ИК-диапазоне. И это не фотография, а компьютерное изображение, где каждая точка соответствует записи в каталоге.

Высокая плотность звёзд позволяет исследовать распределение пылевой материи. Нанесём

на карту не сами звёзды, а лишь средний показатель цвета всех звёзд, попадающих в конкретный пиксель изображения, — это десятки тысяч и более звёзд (рис. 7). Полученное изображение отчётливо показывает “покраснение” цвета, вызванного в основном распределением пылевой материи.

Наконец, с помощью каталогов такой мощности можно исследовать и небольшие области, но очень подробно. На рисунке 8 показаны окрестности шарового звёздного скопления M13 по данным каталога NOMAD. Ещё раз обращаю внимание на то, что это не фотография, а построенное компьютерным способом изображение.

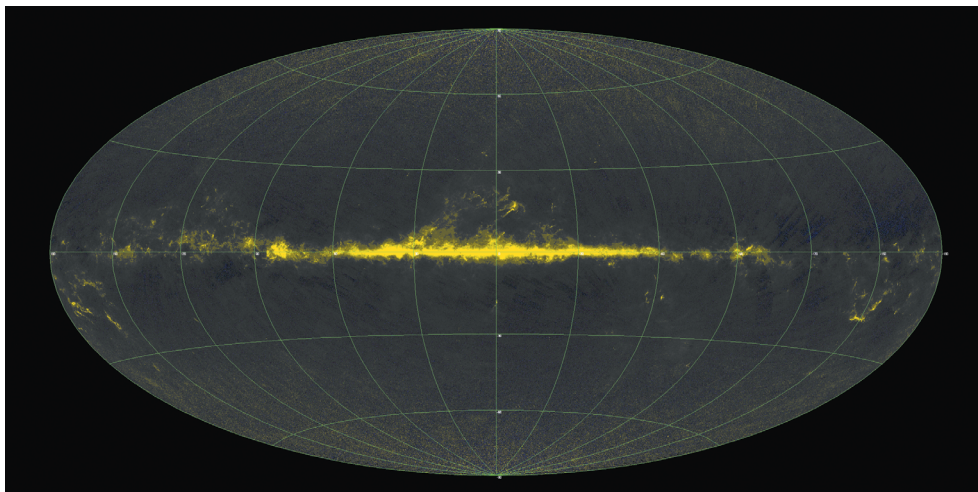


Рис. 7. Средний показатель цвета (J-K) звезды каталога NOMAD. Жёлтый цвет соответствует большему значению, голубой – меньшему

При всех достоинствах каталога лишь 340 млн звёзд (!) имеют данные о собственных движениях и их точность неоднородна. Поэтому сейчас используют массовые каталоги следующего поколения (рис. 9). Они меньше NOMAD, но значительно точнее.

Каталог UCAC4 содержит 113 млн звёзд от 8 до 16 звёздной величины [25]. Ошибки их собственных движений составляют от 1 до 10 мсд/год. В

UCAC4 сосредоточены фотометрические данные из проекта 2MASS – инфракрасного наземного каталога с 437 млн объектов, содержащего положения и звёздные величины в трёх полосах H, J, Ks, но не имеющего данных о собственных движениях звёзд [26].

Каталог PPMXL – самый массовый – содержит около 900 млн звезд и, по-видимому, полный до 20 звёздной величины [27]. Точность собственных движений оценивается интервалом от 4 до 10 мсд/год. Однако практика показала, что реальная точность координат и собственных движений в несколько раз хуже. PPMXL содержит фотометрические данные в 6 полосах: двух видимых и четырёх инфракрасных, но не для всех звёзд.

Оба каталога основаны главным образом на наблюдениях Военно-морской обсерватории США (USNO). Кроме того, в них используется информация из более чем 140 других звёздных каталогов.

Каталог XPM составлен путём объединения данных 2MASS и наблюдательного каталога USNO-A2.0, что позволило получить положения и собственные движения 314 млн звёзд в диапазоне звёздных величин от 10^m до 20^m [28]. Алгоритм вычисления собственных движений построен так, что они абсолютизированы относительно галактик, находящихся на таких расстояниях, при которых на сегодняшнем уровне точности их собственные движения незаметны. Это позволил сделать уже упоминавшийся каталог 2MASS, где помимо координат точечных источников (звёзд) содержится информация о положении примерно 1 млн протяжённых объектов, большая часть которых – галактики.

UCAC4, PPMXL и XPM – самые массовые и точные астрометрические каталоги наземной аст-



Рис. 8. Окрестности звёздного скопления M13, полученные по данным NOMAD

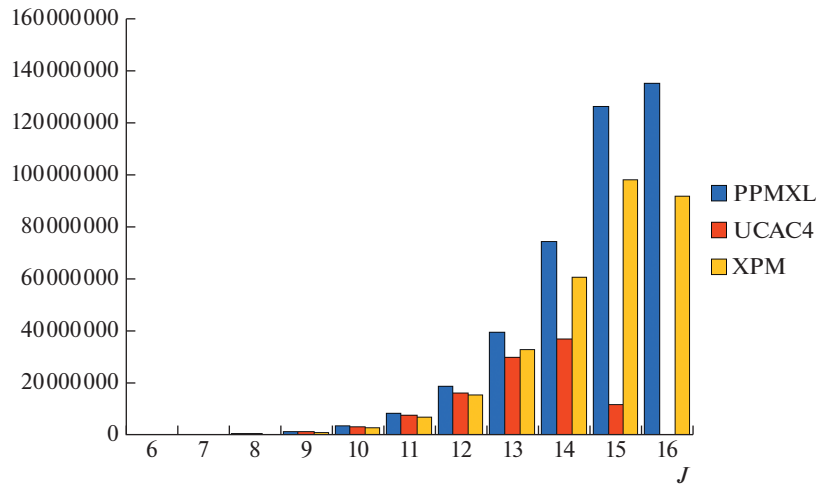


Рис. 9. Распределение звёзд массовых звёздных каталогов по звёздной величине (только те звёзды, у которых есть эти фотометрические данные)

рометрии. Сравнение показывает некоторые систематические различия между ними [29]. Вообще говоря, сравнение данных разных каталогов — классическая астрометрическая задача, позволяющая оценить их точность и уровень ошибок в данных — случайных и систематических. Если влияние первых можно уменьшить путём массовости, то вторые — более опасные. Систематические ошибки, то есть имеющие вид какой-либо функциональной зависимости от координат, блеска звезды, могут быть неправильно интерпретированы как реальные кинематические эффекты. Выявление систематических ошибок — одна из важнейших задач наблюдательной астрометрии [30].

КОСМИЧЕСКАЯ МИССИЯ GAIA

Космический аппарат. После завершения проекта Hipparcos сразу появилась идея новой миссии. Планировалось несколько вариантов, но финансовую поддержку получил проект GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) [31]. Аппарат, запущенный 19 декабря 2013 г., до сих пор работает на орбите. Стоимость всего проекта, включая обработку данных, приближается к 1 млрд евро.

Принципиально аппарат похож на Hipparcos. GAIA, как и Hipparcos, измеряет дуги (угловые расстояния) между объектами. Оптическая схема телескопа состоит из двух зеркальных телескопов с размером основных зеркал (M1, M1) 1.5×0.5 м (рис. 10). С помощью вспомогательных зеркал оба телескопа проецируют изображение в одну фокальную плоскость, а разделение изображений возложено на цифровую обработку. В отличие от Hipparcos, космический телескоп GAIA не использует так называемый входной ката-

лог — предварительный список звёзд, астрометрические параметры которых уточняются наблюдениями [32]. В GAIA идентификация и классификация объектов происходит прямо на борту аппарата. В фокальной плоскости размещена, по-видимому, самая большая в мире ПЗС-матрица (точнее, мозаика из матриц) (рис. 11) [33].

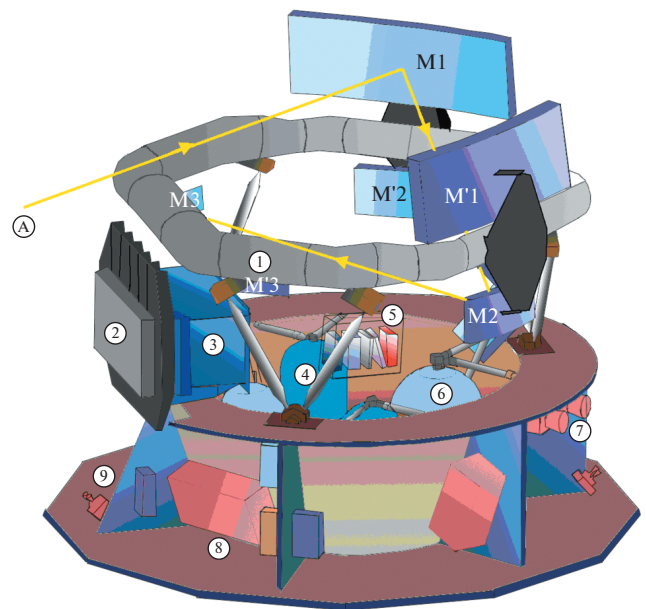


Рис. 10. Схема телескопа GAIA: M1, M2, M3 — зеркала первого телескопа; M'1, M'2, M'3 — зеркала второго телескопа; 1 — система крепления зеркал; 2 — система охлаждения сенсоров; 3 — сборка в фокальной плоскости; 4 — баллон с азотом; 5 — дифракционные решётки спектрографа; 6 — топливный бак; 7 — звёздный датчик; 8 — электроника и батареи; 9 — главная энергетическая установка

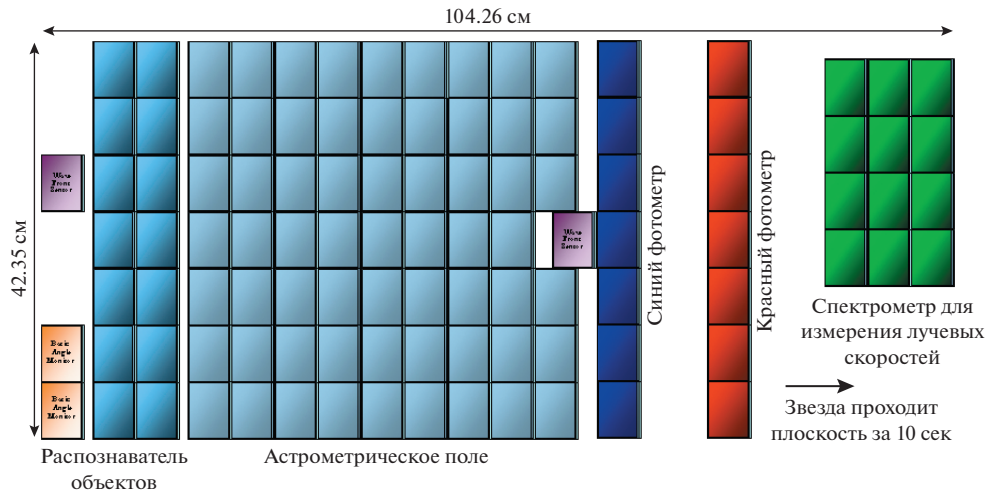


Рис. 11. Мозаика ПЗС-матриц в фокальной плоскости телескопа

Космический аппарат движется вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля–Солнце так, чтобы не попадать в тень Земли, при этом он не отдаляется от L2 на расстояние свыше 1 км (рис. 12). Для повышения надёжности первичных данных, а также результатов их анализа ориентировка спутника должна быть известна с точностью около 150 м, а скорость — с точностью до 1 мм/с (рис. 13). В течение 6.5 лет аппарат, медленно вращаясь и прецессируя, сканирует небесную сферу таким образом, чтобы в среднем каждый объект наблюдался не менее 70 раз за весь срок работы спутника (рис. 14). Это даёт возможность определить координаты объекта с точностью 10 микросекунд дуги (мксд) и собственные движения звёзд с точностью 10 мксд/год. Напомним, что GAIA — сканирующий аппарат, поэтому его невозможно навести на конкретный объект и нельзя изменить план наблюдений.

Помимо астрометрических данных, GAIA сразу проводит грубую спектральную классификацию с помощью двухполосного фотометра в диапазонах 330–680 и 640–1050 нм, а также более тонкий спектральный анализ для определения лучевых скоростей и параметров звёздных атмосфер, что в принципе не было реализовано на

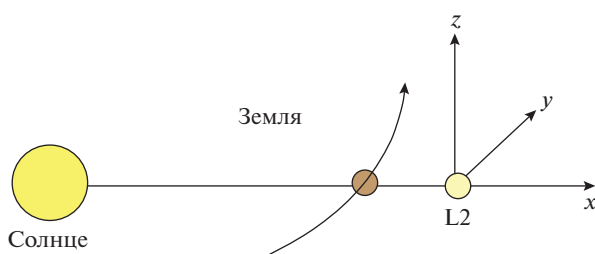


Рис. 12. Местонахождение аппарата — точка L2

Hipparcos [34]. Фотометры также позволяют построить кривые блеска переменных звёзд.

После вычислений для каждой звезды будет получена её траектория на небесной сфере. Пример такой траектории приведён на рисунке 15, где отчётливо виден параллактический эллипс, а его смещение за несколько лет позволяет оценить собственное движение звезды.

Проект GAIA в числах. Финальная версия каталога будет содержать примерно 1.6 млрд объектов. Для 10^6 звёзд ярче 12^m точность определения положений составит около 4 мксд (0.004 мсд), для $30 \cdot 10^6$ звёзд ярче 15^m — 10 мксд, для всех звёзд сла-

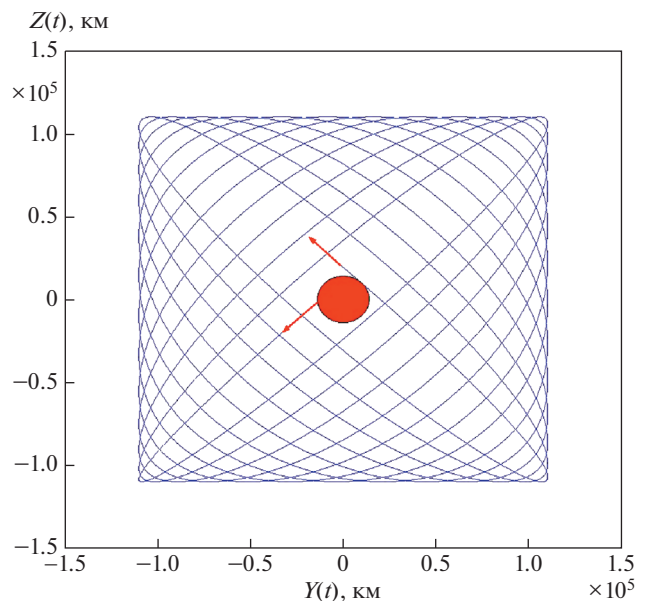


Рис. 13. Орбита аппарата относительно точки Лагранжа L2

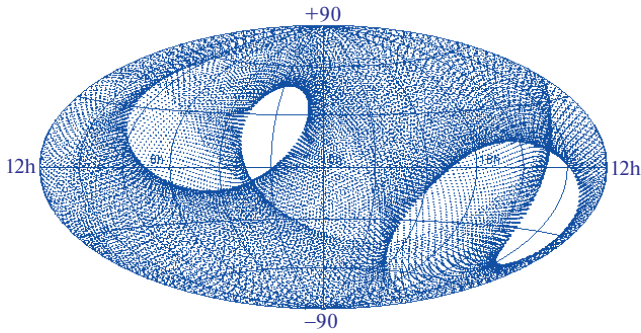


Рис. 14. Сканирование небесной сферы за 100 дней

бее, но ярче 20^m – не менее 150 мксд. Плотность покрытия будет составлять от 25 тыс. до 3 млн звёзд на квадратный градус вблизи галактического экватора.

GAIA определит лучевые скорости 200 млн звёзд (на сегодняшний момент они известны только для 7 млн). Точность лучевых скоростей ярких звёзд ($V < 15^m$) ожидается на уровне 1–2 км/с, более слабых – 5–10 км/с [35].

GAIA проанализирует переменность 100 млн звёзд, определит массы примерно 10 тыс. звёзд, проведёт поиск экзопланет на расстояниях до 200 пк. В зону наблюдения аппарата попадут 500 тыс. малых планет Солнечной системы. А на космологических расстояниях ожидается открытие 500 тыс. (!) новых квазаров.

Проект GAIA представляет собой сложнейшую вычислительную задачу. Для полной обработки данных потребуются выполнить до 10^{21} инструкций с плавающей точкой. Для сравнения можно сказать, что в год запуска GAIA все компьютеры мира выполняли 10^{25} таких операций в

год! Кстати, один из самых больших вычислительных проектов в мире – поиск внеземных искусственных сигналов в радионаблюдениях с помощью распределённых вычислений (программа SETI) – тоже астрономический [36]. Если бы потребовалось затратить всего секунду времени на обработку одного объекта, то пришлось бы ждать 30 лет до выхода финального каталога. Прямой Фурье-анализ всех переменных звёзд занял бы 100 лет, если бы выполнялся на одном ПК.

Для решения этих сложных вычислительных задач на аппарате установлен компьютер, сжимающий “сырые” данные и передающий их на Землю со скоростью 3–8 Мбит/с, которые в свою очередь обрабатываются в специально построенном для этого вычислительном центре в г. Мадриде. Полный объём переданных с космического аппарата сырых данных оценивается в 250 Тбит, распакованные займут 150 Тбайт, а рабочие копии, архивы, тесты – 1 Пбайт [37].

Общая теория относительности в GAIA. Для достижения точности на уровне долей мксд требуется применять релятивистские небесно-механические модели и модели распространения света [38]. Использование ньютоновской модели приведёт к ошибкам в астрометрических данных.

Релятивистская модель наблюдения включает:

- моделирование релятивистской аберрации [39];
- учёт релятивистских эффектов в движении спутника вплоть до поправок уровня 0.6 мм/с;
- релятивистские эффекты в распространении света, учёт монополярного гравитационного поля всех больших планет и некоторых их спутников, квадрупольного поля планет-гигантов, то есть учёт несферичности гравитационных полей, влияющие движения тел [40];

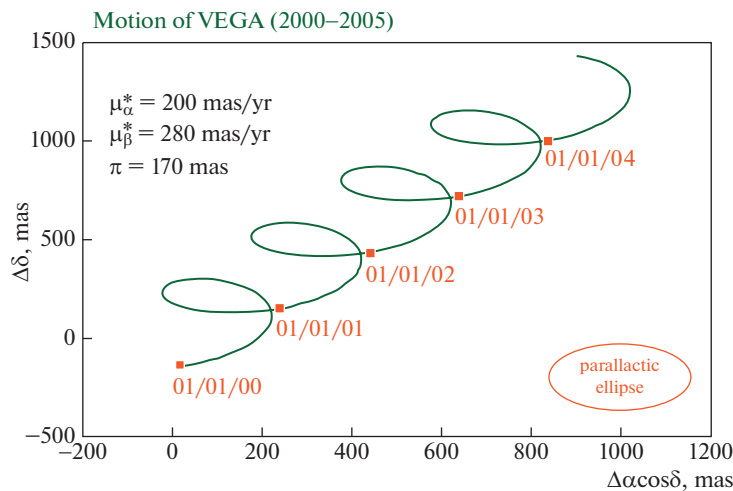


Рис. 15. Пример траектории звезды

Таблица 3. Сравнение релизов каталога GAIA

	DR3	DR2	DR1
Общее количество источников	≈1800 000 000	1 692 919 135	1 142 679 769
Количество источников с пятью параметрами	≈1500 000 000	1 331 909 727	2 057 050
Количество источников с двумя параметрами	≈300 000 000	361 009 408	1 140 622 719
Источники со средней величиной G	≈1800 000 000	1 692 919 135	1 142 679 769
Источники со средней G_{BP} фотометрией	≈1500 000 000	1 381 964 755	–
Источники со средней G_{RP} фотометрией	≈1500 000 000	1 383 551 713	–
Источники с лучевыми скоростями	неизвестно	7 224 631	–
Переменные источники	неизвестно	550 737	3194
Известные астероиды с данными эпохи	неизвестно	14 099	–
Эффективные температуры (T_{eff})	неизвестно	161 497 595	–
Источники с радиусом и светимостью	неизвестно	76 956 778	–

- релятивистские эффекты в движении малых тел Солнечной системы;

- релятивистские эффекты в движении звёзд (эффект Рёмера, микролинзирование).

Долгое время общая теория относительности оставалась дисциплиной, скорее, теоретической и использовалась при описании экстремальных объектов (нейтронных звёзд, чёрных дыр). Но высокоточные наблюдения перевели её в разряд практических дисциплин. Без учёта релятивистских эффектов точности в микросекунды дуги недостижимы. Следует сказать, что релятивистская модель распространения света в Солнечной системе уже применялась при обработке данных Hipparcos [41].

Научные задачи GAIA. В ходе миссии GAIA планируется решить широкий спектр научных задач. Даже краткое их перечисление составляет внушительный список:

- картирование Галактики;
- физика звёзд (классификация, светимость, эффективные температуры, индекс металличности);
- кинематика и динамика Галактики;
- калибровка шкалы космических расстояний;
- уточнение возраста Вселенной;
- распределение тёмной материи в Галактике (микролинзирование, наблюдения “коричневых” карликов);

- построение фундаментальной системы отсчёта, связь радио- и оптической систем через прямое наблюдение квазаров;

- проверка общей теории относительности;
- уточнение модели Солнечной системы.

Особо следует остановиться на задаче калибровки шкалы расстояний [42]. Как упоминалось в начале статьи, расстояние – самый сложный для наблюдения параметр. Метод оценки расстояний до галактик и, в конечном счёте, масштаб всей Вселенной определяется точностью расстояния до цефеид, надёжностью получения зависимости период–светимость. Для калибровки шкалы расстояний аппарату GAIA необходимо измерить:

- параллаксы до цефеид, находящихся ближе 3 кпк, с точностью лучше 1%, а расстояния до всех цефеид в Галактике – с точностью не хуже 4%;
- параллаксы для переменных типа RR Lyg, находящиеся ближе 3 кпк, с точностью 1%, для остальных звёзд этого типа ошибка параллакса не должна превышать 10%;
- параллаксы мирид в Галактике (относительная ошибка – не более 6%);
- параллаксы индивидуальных звёзд в 20 шаровых звёздных скоплениях с точностью 10%, а средние расстояния до всех шаровых скоплений – на уровне 1%;
- параллаксы цефеид в Магеллановых Облаках с точностью 30%, что позволит ответить на вопрос, какова зависимость период–светимость для цефеид в нашей и других галактиках.

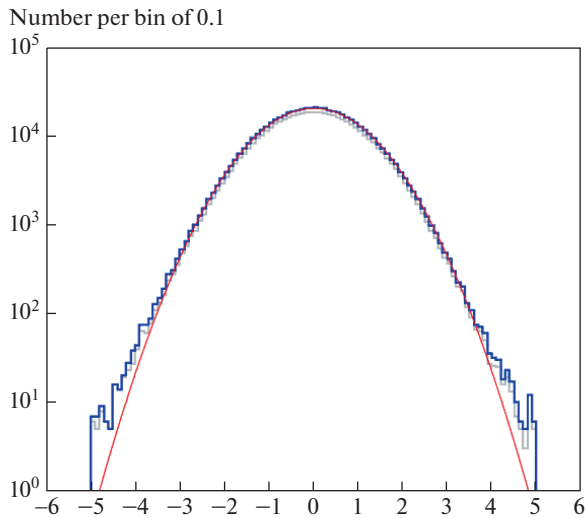


Рис. 16. Распределение параллакс 556 849 квазаров, по данным GAIADR2

Предварительные результаты миссии. В 2016 г. вышел так называемый первый релиз каталога GAIA — GAIA DR1 [43]. Он содержит 11 40 622 719 звёзд, для которых приведены только координаты, и особое подмножество TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution — 2057050 звёзд с точностью около 0.3 мсд), ставшее комбинацией каталогов Hipparcos, Tycho-2 и данных GAIA. В наборе DR1 также зафиксированы кривые блеска около 3 тыс. цефеид и звёзд типа RR Лиры. Уже первый релиз позволил связать систему каталога с ICRF [44]. С подмножеством TGAS проводились исследования кинематики Галактики и в нашей стране [45].

25 апреля 2018 г. увидел свет второй релиз — GAIA DR2 [46]. Он содержит значительный объём данных, полученных исключительно на космическом аппарате (табл. 3). Однако, по заявлению авторов [47], использовать индивидуальные параллаксы следует с осторожностью. Большое количество звёзд имеет даже отрицательный параллакс. На рисунке 16 представлено распределение параллакс полумиллиона квазаров (он должен быть нулевым), но, как видно, разброс параллакса для таких объектов составляет ± 5 мсд. В силу этого построение диаграммы Герцшпрунга—Рассела даёт весьма размытую картину (рис. 17а), а если воспользоваться усреднёнными данными о расстоянии для звёзд, принадлежащих рассеянному скоплениям, то картина становится более чёткой (рис. 17б). На этих диаграммах впервые использован показатель цвета $G_{BP} - G_{RP}$ из разности звёздных величин, определённых на аппарате, а не с помощью наземных источников [48].

В декабре 2021 г. вышел так называемый ранний третий релиз каталога [49], в котором есть

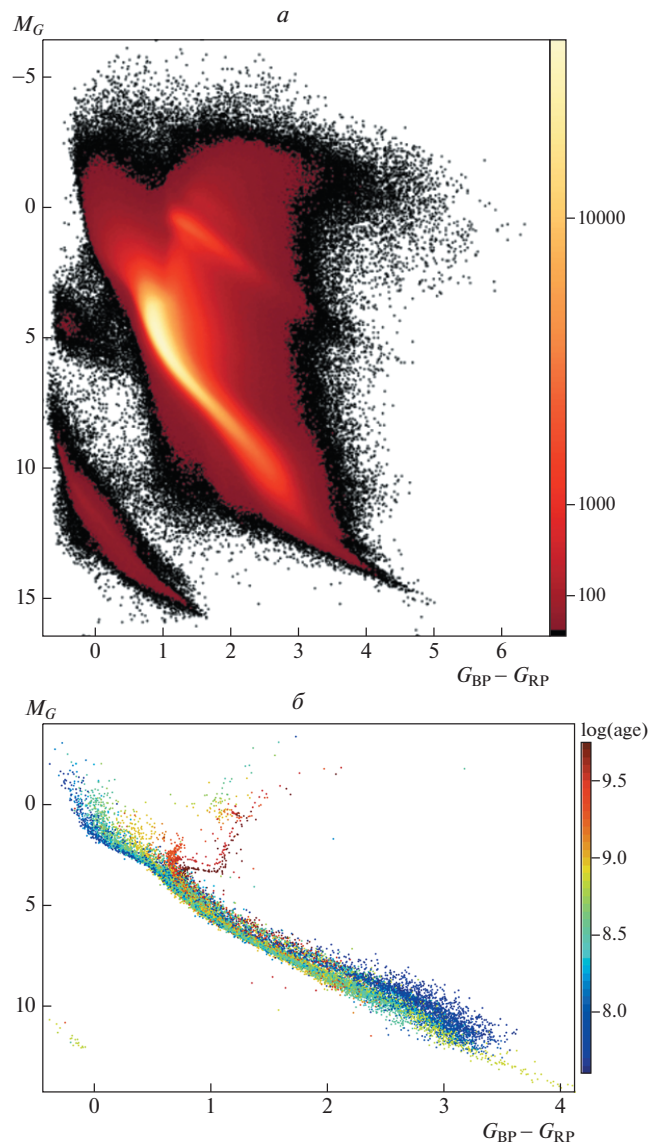


Рис. 17а, б. Диаграммы Герцшпрунга—Рассела для всех звёзд и 32 рассеянных звёздных скопления, по данным GAIADR2

информация о почти 1.5 млрд звёзд, имеющих все 5 астрометрических параметров вплоть до звёзд 21^m . Для такого же количества звёзд представлена улучшенная двухполосная фотометрия. При этом утверждается, что фотометрическая система DR3 отличается от DR2.

Издание первой финальной версии, в которой полностью реализуются заявленные точности, намечен на 2022 г.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-11-00001.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schaefer B.E.* Discovery of the Lost Star Catalog of Hipparchus on the Farnese Atlas // American Astronomical Society meeting. Abstracts. San Diego, CA. January 9–13, 2005.
2. *Витязев В.В., Гусева И.С., Кияев В.И. и др.* Небесные и земные координаты. Учебное пособие по астрометрической практике. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011.
3. *Souchay J., Feissel-Vernier M.* The International Celestial Reference System and Frame // ICRS Center Report for 2001–2004.
4. *Киселёв А.А.* Собственные движения “неподвижных” звёзд и их значение в астрономии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 2. С. 81–84.
5. *Ковалевский Ж.* Современная астрометрия. Фрязино: Век 2, 2004.
6. *Соколовская З.К.* Первые определения звёздных параллаксов. К вопросу о приоритете одного открытия // Вестник АН СССР. 1972. № 3. С. 132–136.
7. *van Altena W.F., Lee J.T., Hoffleit D.* Yale Trigonometric Parallaxes Preliminary (van Altena+ 1991). New Haven, USA: Yale University Observatory, 1995.
8. *Володаров В.П.* Добросовестный наблюдатель // Вестник РАН. 1996. № 12. С. 1104–1107.
9. *Fricke W., Schwan H., Lederle T.* Veroeff. Astron. Rechen-Institut Heidelb. Fifth Fundamental Catalogue (FK5). 1988. № 32.
10. *Roeser S., Bastian U.* Catalogue of Positions and Proper Motions // Astronomy and Astrophysics Supplement. 1988. V. 74. P. 449–451.
11. *Perryman M.* The History of Astrometry // European Physical Journal. 2012. V. 37. № 5. P. 745–792.
12. *Витязев В.В.* Успехи астрометрии // Планетарий. 1999. № 22.
13. *Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж.* Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Под ред. Л.И. Матвеевко. М.: Мир, 1989.
14. *Матвеевко Л.И.* История РСДБ – становление и развитие. СПб.: Институт прикладной астрономии РАН, 2007.
15. ESA. The Hipparcos and Tycho Catalogues. Noordwijk, the Netherlands: ESA, Publications Division, 1997.
16. *Цветков А.С.* Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos. Учебно-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005.
17. *Цветков А.С.* Руководство по работе с каталогом Tycho-2. Учебно-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005.
18. *Arias E.F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J.-F.* The Extragalactic Reference System of the International Earth Rotation Service, ICRS // Astron. & Astroph. 1995. V. 303. P. 604–608.
19. Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium. <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/venice-97-proceedings>
20. *Høg E., Fabricius C., Makarov V.V. et al.* The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars // Astron. & Astroph. 2000. V. 355. № 1. P. L27–L30.
21. *Wielen R., Schwan H., Dettbarn C. et al.* Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part I: Basic Fundamental Stars with Direct Solutions // Veröff. Astron. Rechen-Inst. Heidelberg. 1999. № 35. P. 1–209.
22. *Wielen R., Schwan H., Dettbarn C. et al.* Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part III: Additional Fundamental Stars with Direct Solutions // Veroeff. Astron. Rechen-Inst. Heidelberg. 2000. № 37. P. 1–307.
23. *Zacharias N., Monet D.G., Levine S.E. et al.* The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD). American Astronomical Society 205th Meeting // Bulletin of the American Astronomical Society. 2004. V. 36. P. 1418.
24. *Snyder J.P.* Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections. Chicago, USA: University of Chicago Press, 1993.
25. *Zacharias N., Finch C.T., Girard T.M. et al.* The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // Astron. J. 2013. V. 145. № 2. P. 1–14.
26. *Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // Astron. J. 2006. V. 131. № 2. P. 1163–1183.
27. *Roeser S., Demleitner M., Schilbach E.* The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS) // Astron. J. 2010. V. 139. № 6. P. 2440–2447.
28. *Fedorov P., Myznikov A., Akhmetov V.* The XPM Catalogue. Absolute proper motions of 280 million stars // MNRAS. 2009. V. 393. № 1. P. 133–138.
29. *Vityazev V., Tsvetkov A.S., Petrov S.D., Trofimov D.A.* Comparison of XPM and UCAC4 catalogues in the Galactic coordinate system // Astron. Nachr. 2016. <https://doi.org/10.1002/asna.201613220>
30. *Vityazev V.V., Tsvetkov A.S.* Comparisons of the Galactic coordinate frames realized by the catalogues PPMXL and UCAC4 // MNRAS. 2016. V. 461. № 3. P. 2410–2425.
31. ESA. Gaia Science Community. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>
32. *Turon C., Gomez A.E., Morin D.* The Hipparcos Input Catalogue // Astron. & Astroph. 1992. V. 258. P. 74–81.
33. ESA. GAIA Spacecraft summary. <https://sci.esa.int/web/gaia/-/28820-summary>
34. ESA. Focal plane. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/focal-plane>
35. ESA. Radial Velocity with Gaia. <https://sci.esa.int/web/gaia/-/31367-radial-velocity>
36. *Гундилис Л.М.* SETI в России: последнее десятилетие XX века // Земля и Вселенная. 2000. № 5. С. 39–48.
37. ESA. Gaia Data Processing and Analysis Consortium. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac>
38. *Crosta M., Vecchiato A.* Gaia relativistic astrometric models // Astron. & Astroph. 2010. V. 509. № A37. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912691>
39. *Preti G., de Felice F.* Relativistic satellite astrometry at μ arcsec precision and the measurement of the stellar

- aberration // *Astron. & Astroph.* 2010. V. 513. № A68. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913555>
40. *Klioner S.* A Practical Relativistic Model of Microarcsecond Astrometry in Space // *Astron. J.* 2001. V. 125. № 3. P. 1580–1597.
41. *The Hipparcos and Tycho Catalogues.* V. 3. Chapter 16. European Space Agency, 1997.
42. *Turon C., Luri X., Masana E.* Building the cosmic distance scale: from Hipparcos to Gaia, *Astrophysics and Space Science.* 2012. V. 341. P. 15–29.
43. *Brown A., Vallenari A., Prusti T. et al.* Gaia Data Release 1 // *Astron. & Astroph.* 2016. V. 595. № A2. P. 1–23.
44. *Mignard F., Klioner S., Lindegren L. et al.* Gaia Data Release 1: Reference frame and optical properties of ICRF sources // *Astron. & Astroph.* 2016. V. 595. № A5. P. 1–16.
45. *Vityazev V.V., Popov A.V., Tsvetkov A.S. et al.* Kinematics of stars from the TGAS (Gaia DR1) Catalogue // *Astron. Letters.* 2018. V. 44. № 4. P. 236–247.
46. *Brown A., Vallenari A., Prusti T. et al.* Gaia Data Release 2 // *Astron. & Astroph.* 2018. V. 616. № A2.
47. *Luri X., Brown A.G.A., Sarro L.M. et al.* Gaia Data Release 2: Using Gaia parallaxes // *Astron. & Astroph.* 2018. V. 616. № A9. P. 1–19.
48. ESA. Gaia Collaboration. Gaia Data Release 2. Observational Hertzsprung-Russell diagrams // *Astron. & Astroph.* 2018. V. 616. № A10. P. 1–29.
49. ESA. Gaia Early Data Release 3. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>