

А.С.Цветков<sup>1</sup>

*Санкт-Петербургский государственный университет*

## **Достижения космической астрометрии**

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

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-11-00001

### **Аннотация**

Астрометрия – основа астрономических наблюдений и измерений координат и времени. Главной задачей астрометрии является реализация системы отсчета – той самой инерциальной системы отсчета, о которой говорится в первом законе Ньютона. Еще с античных времен астрономы создавали для этой цели звездные каталоги. Работа на ними привела к открытию прецессии и нутации земной оси, собственных движений и параллаксов звезд, открытию орбитального движения двойных звезд. Наблюдения в радио и оптическом диапазоне очень далеких объектов – квазаров – именно на них базируется современная система отсчета International Celestial Reference Frame (ICRF). Именно к ним привязывается система GPS или ГЛОНАСС в вашем навигаторе в телефоне. XXI век с его вычислительными возможностями привел к созданию звездных каталогов невиданной мощности, содержащих свыше миллиарда объектов. Но основной прорыв, даже революцию в астрометрии совершили космические наблюдения. Уже два космических аппарата создали звездные каталоги, точность которых фантастична и позволяет прикоснуться к решению таких задач, сама постановка которых была ранее не мыслима. Обзору успехов астрометрии за последние два тысячелетия, массовым звездным каталогам и космическим астрометрическим проектам посвящена эта статья.

### **Abstract**

Astrometry is the basis for astronomical observations and measurements of coordinates and time. The main task of astrometry is the implementation of a frame of reference – the very inertial frame of reference, which is referred to in Newton's first law. Since ancient times, astronomers have created star catalogs for this purpose. Work on them led to the discovery of the precession and nutation of the Earth's axis, proper motions and parallaxes of stars, and the discovery of the orbital motion of binary stars. Observations in the radio and optical range of very distant objects – quasars – are a base for the modern International Celestial Reference Frame (ICRF). The GPS or GLONASS systems is tied to your navigator in the phone are used ICRF. The 21<sup>st</sup> century with its computational capabilities has led to the creation of stellar catalogs of unprecedented power, containing over a billion objects. But the main breakthrough, even the revolution in astrometry, was made by space observations. Already two spacecraft have created stellar catalogues, the accuracy of which is fantastic and allows you to touch the solution of such problems, the very formulation of which was previously inconceivable. This article is devoted to an overview of the successes of astrometry over the past two millennia, massive stellar catalogs and space astrometric projects.

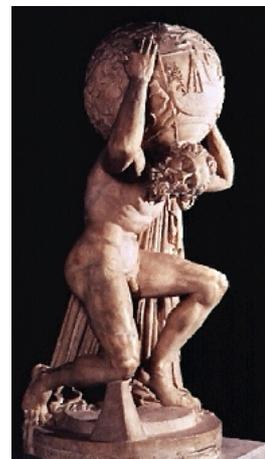
---

<sup>1</sup> a.s.tsvetkov@inbox.ru

*Если звезды заносят в каталоги,  
Значит это кому-то нужно!*

## **Задачи астрометрии и историческое введение**

Астрометрия – самая древняя часть астрономии. Ее основной метод – позиционные измерения, т.е. измерение точных направлений на объекты, в первую очередь этими объектами являлись звезды. Еще с античных времен результаты таких наблюдений оформлялись в виде звездных каталогов. Наиболее известен из древних каталогов (не сохранившийся до наших дней) каталог древнегреческого астронома Гиппарха (II в. до н.э.). В 2005 году было сделано предположение, что звездный каталог Гиппарха, датированный 129 г. до н.э. присутствует на римской статуе, именуемой Атлантом Фарнезе (Шефер, 2005). Надо сказать, что каталог Гиппарха был далеко не первым, так как известно, что, сравнив положения звезд в своем каталоге с положением звезд в более ранних каталогах, Гиппарх открыл такое явление, как прецессию, природу которой смог объяснить лишь Исаак Ньютон в 1686 г.



*Рис. 1. Атлант Фарнезе*

Основной вопрос: зачем нужны звездные каталоги вообще?

Следует сказать, что астрономические каталоги бывают разными. Есть каталоги туманностей, галактик, переменных звезд, и т.п. Мы назовем их астрофизическими. Но нас будут интересовать астрометрические каталоги. Какие данные обычно содержатся в них? Приведем их в табл. 1.

Таблица 1. Данные астрометрических каталогов

<b>Данные</b>	<b>Комментарий</b>
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 звездных каталогах.
Параллаксы	Расстояния до звезд. Присутствуют в специальных каталогах и в каталогах космической астрометрии.
Звездные величины	Блеск звезд в одной или в нескольких общепринятых шкалах. Хоть это величина и астрофизическая, но почти всегда наличествует.
Информация о кратности	Часто приводится, указывая на наличие особенностей в астрометрических данных.
Номера звезд по другим каталогам	Полезная информация, позволяющая объединять и сравнивать данные различных каталогов.
Дополнительная информация	Различные данные обычно астрофизического характера, как правило, полученные из других каталогов. Например, лучевые скорости – скорости звезды вдоль луча зрения, полученные по спектральным измерениям.

Положения и собственные движения – точные координаты и скорости их изменения нужны для построения системы отсчета на небесной сфере. Существует абстрактное понятие, которое в английском языке называется Reference System (система отсчета) – теоретическое построение, и конкретное – Reference Frame (к сожалению, переводится также: система отсчета) – реализация системы отсчета на практике (Витязев и др., 2011). Так вот наиболее

точным воплощением абстрактной инерциальной системы отсчета как раз и являются звездные каталоги. Именно к ним происходит привязка координат различных объектов на небесной сфере, и в конечном итоге и на Земле. Всем известная система GPS/ГЛОНАСС – привязана через космические аппараты к каталогу квазаров – сверх далеких объектов, собственными движениями которых можно пренебречь (Суше, Фессель-Вернье, 2014).

Собственные движения звезд (proper motions) – скорости изменения координат звезд. Их знание позволяет перевести координаты звезд на другую эпоху как вперед, так и назад. Анализ самих собственных движений позволяет изучать кинематику звезд, как околосолнечного пространства, так и Галактики в целом. Открытие собственных движений принадлежит знаменитому английскому астроному Эдмунду Галлею, обнаружившему в 1718 году, что некоторые яркие звёзды из каталога Гиппарха-Птолемея заметно изменили свои положения среди других звёзд (Киселев, 2002).

Крайне сложно и драматично решался вопрос о расстояниях до звезд. Попытки обнаружить параллактические смещения звезд, вызванные обращением Земли вокруг Солнца, велись еще в античности. Их отсутствие (конечно же, вызванное чрезвычайной малостью эффекта) было одним из аргументов против гелиоцентрической системы мира. Поиском параллаксов в Новое время занимались такие видные ученые как Тихо Браге, Галилео Галилей, Роберт Гук. В ходе поисков параллаксов Джеймс Бредли обнаружил в 1728 г. аберрацию света и нутацию земной оси, а Уильям Гершель в 1804 году – орбитальное движение у двойных звезд (Ковалевский, 2004).

Лишь в 1837 году В.Я.Струве в Дерптской обсерватории, а 1838 году Фридрих Бессель в Кёнигсбергской обсерватории и Томас Хендерсон (обсерватория Мыса Доброй Надежды) провели первые достоверные оценки параллаксов ближайших звезд, которые составили лишь доли секунды дуги (Соколовская, 1972). Так параллакс Альтаира оказался равен у Струве  $0.181'' \pm 0.094''$ . Для более наглядного представления малости измеряемых углов можно воспользоваться следующей табл. 2.

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

Расстояние	Угол
4 км	1"
40 км	0.1" – параллаксы ближайших звезд
4 000 км (Москва – Лиссабон)	0.001" или 1 мсд (mas) – точность Hipparcos
400 000 (Земля-Луна)	0.01 мсд – точность GAIA

Определение тригонометрических параллаксов (т.е. расстояний до звезд, полученных геометрическим методом) посредством наземных наблюдений крайне трудоемкое занятие. Земная атмосфера ставит предел при наблюдении малых углов. Предельно достижимые статистические точности наземных наблюдений в большинстве своем ограничены значением  $0.05''$ , что даст ошибку в определении параллакса в 100% уже на расстоянии 20 пк. Всё это привело к тому, что с 1838 года по 1991 г. были измерены параллаксы всего лишь 8000 звезд притом с большой неопределенностью (ван Альтена, 1991+). Не следует путать тригонометрический параллакс звезд с так называемыми фотометрическими, спектральными параллаксами. Под последними подразумевают косвенные оценки расстояний до звезд по их астрофизическим характеристикам. Но для того чтобы это можно было сделать, необходимо определить «истинным» тригонометрическим способом расстояния до звезд определенных типов. В дальнейшем эта информация может быть использована для вычисления расстояния до звезд, тригонометрический параллакс которых недостижим для измерений.

### **Эпоха наземных астрометрических измерений**

Последним каталогом дотелескопической эпохи следует считать каталог одного из лучших наблюдателей Тихо Браге, который создавался в 1570–1600 годы. (Володаров, 1996). Точность положений этого каталога составляет около 1 минуты дуги. Именно этот каталог

позволил Иоганну Кеплеру вывести свои знаменитые законы, которые привели к открытию закона всемирного тяготения Исааком Ньютоном.

XVIII-XIX столетия характеризуются постепенным увеличением точности наблюдений, которая к середине XX века достигла точности порядка  $0.1''$ . Последний каталог знаменитой серии FK (The Catalogues of Fundamental Stars) FK5 Basic (Фрике и др., 1988) содержал всего 1535 звезд, положения и собственные движения которых были уже на пределе точности наземных наблюдений, а истории наблюдений этих звезд 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 звезд в фундаментальных каталогах.

Для распространения фундаментальных систем на большее число звезд использовались фотографические каталоги, такие как PPM (Position and Proper Motions) (Рёзер и Бастиан, 1988), содержащий около 400 тыс. звезд, но со значительно меньшей точностью. Такие каталоги назывались относительными. Ошибки определения фундаментальной системы проникали в каталоги-распространители.

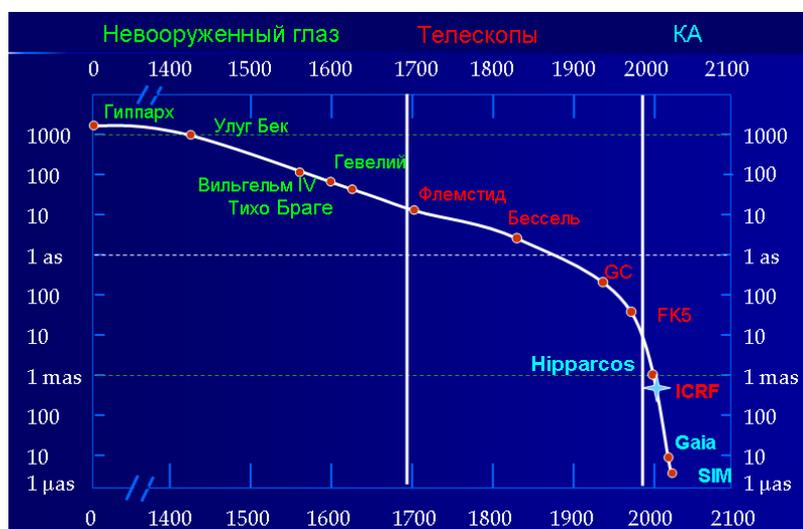


Рис. 2. Динамика точности астрономических наблюдений

Бурно развивающаяся астрофизика требовала от астрометрии, прежде всего, высокоточных расстояний. В астрофизике известен фотометрический метод определения расстояний, использующий зависимость «период–светимость» для переменных звезд-цефеид. Однако для калибровки этой шкалы необходимо промерить расстояние до нескольких цефеид прямым тригонометрическим методом. Ближайшая же к нам цефеида – Полярная звезда – расстояние до нее по данным уже космической астрометрии составляет 137 пк, измерение которого с поверхности Земли могло быть произведено на грани возможного. Остальные цефеиды находятся еще дальше. Определение расстояний до ближайших галактик основано на шкале цефеид, дальнейшие косвенные методы позволяют определить расстояния до далеких скоплений галактик и в финале определить значение постоянной Хаббла и возраст Вселенной. Но для уверенного их определения следует откалибровать зависимость «период–светимость» прямым методом. Этого наземная астрометрия сделать уже не могла (Перриман, 2012).

## Радиоастрометрия

Параллельно с оптическими наблюдениями развивалась радиоастрономия, которая с появлением радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ, VLBI) привела к резкому увеличению точности наблюдений вплоть до  $0.001''$  (Витязев, 1999).

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 возможно соединить непосредственно линиями связи. Но если телескопы расположены на расстояниях несколько тысяч километров друг от друга, а порою и на разных материках то необходимо использовать точные стандарты времени, задаваемые атомными часами. Анализ измерения задержек позволяет получить географические координаты радиотелескопов, небесные координаты наблюдаемых радиоисточников, а также тонкие эффекты во вращении Земли – движение полюсов в ее теле и неравномерность вращения. Точность этих измерений определяется длиной базы интерферометра, то есть расстоянием между телескопами, и длиной волны принимаемого радиоизлучения. В 70-90 годах во всем мире развернулись работы по созданию радиоинтерферометрических сетей, с помощью которых удалось достичь точности позиционных наблюдений квазаров порядка 0.001-0.0005 секунды дуги (Томпсон и др., 1989). В нашей стране такие работы ведутся в рамках проекта КВАЗАР, для осуществления которого в Санкт-Петербурге был создан Институт Прикладной Астрономии Российской Академии Наук (Матвеевко, 2007). В действующую сеть входят радиоастрономические обсерватории «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» и Центр управления, сбора и обработки данных. Все это позволило создать систему отсчета принципиально нового типа – теперь вместо звезд стали использоваться, в основном, квазары, координаты которых были получены на миллисекундном уровне точности.



**Рис.3.** Радиотелескоп сети «Квазар» в Бадарах

Как известно, квазары – это космологические объекты, удаленные от нас на предельные расстояния. Даже если предположить нереально высокие скорости их поперечного движения сопоставимые со скоростью света, то и в этом случае мы не заметим их собственных движений. Таким образом, квазары образуют «сферу неподвижных звезд», которую можно использовать в качестве системы отсчета. Однако не все квазары подходят для ее построения. Некоторые квазары имеют переменную структуру, вызванную физическими процессами внутри них, что приводит к смещению центра радиоизображения. Поэтому для построения системы отсчета было выбрано 667 спокойных радио источников, из них 212 с ошибкой определения положения всего 0.0004 секунды дуги. Новая, радиоастрометрическая система отсчета позволила на новом уровне изучать явления, происходящие на Земле: особенности ее вращения, движение материков, тектонику плит.

Однако радиосистема имеет существенный недостаток – недоступность ее в оптике. И если для системы GPS/ГЛОНАСС это не имеет особого значения, то для оптически наблюдений это создает существенные проблемы. Этот недостаток удалось преодолеть только методами космической астрометрии, то есть проведениями астрометрических измерений в оптическом диапазоне в космосе.

## Первый космический астрометрический проект Hipparcos

В 1989 году 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 звезд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звезд по заданной программе (ESA, 1997).

Обработка этих наблюдений, привела к созданию двух каталогов: Hipparcos, содержащего информацию о 118 218 звездах с точностью определения положений, годовых собственных движений и параллаксов на уровне 1 mas (milli arc second, в русском переводе – мсд – миллисекунда дуги), и каталога Tycho, содержащего уже свыше 1 млн. звезд, с точностью измерения тех же параметров до 25 mas (Цветков, 2005)

Положения и собственные движения звезд в каталогах Hipparcos и Tycho приводятся в фундаментальной системе ICRS (International Celestial Reference System), реализованной в настоящее время с помощью каталога внегалактических радиоисточников, получившего название ICRF (International Celestial Reference Frame) (Ариас и др, 1995). Вследствие того, что внегалактические источники (квазары) были недоступны прямому наблюдению на аппарате Hipparcos (за исключением ЗС 273), пришлось использовать несколько прямых и косвенных методов, чтобы связать предварительную систему каталога Hipparcos с ICRF.

Появление Hipparcos вызвало «бум» статей самой разной направленности. Перечислим кратко лишь некоторые основные результаты (подробно в Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium – свыше сотни публикаций)

1. Разработка самой технологии космических астрометрических наблюдений. Связывание космической системы отсчета с наземной. Создание программных продуктов, использующих данные Hipparcos и Tycho, обеспечение доступа астрономической общественности к результатам космической миссии.
2. Калибровка диаграммы Герцшпрунга-Рессела. Калибровка светимости переменных звезд разных типов (цефеиды, мириды). Определение абсолютных звездных величин. Измерение масс компонентов двойных звезд.
3. Исследование кинематики звезд окосолнечного пространства. Изучение структуры звездных ассоциаций. Поиск движущихся скоплений. Распределение темной материи в Галактике.
4. Калибровка шкалы межгалактических расстояний. Определение абсолютных возрастов шаровых звездных скоплений.

Следует отметить, что, прежде всего, успех миссии Hipparcos связан с определением тригонометрических расстояний 100 тыс. звезд на уровне 1 мсд, что дает точность в 20% до расстояния в 200 пк, и 50% – до расстояний 400 пк. Однако для объектов, находящихся на расстоянии 1 кпк и далее, точность Hipparcos не достаточна.

Собственным движениям, полученным, на аппарате оказалась свойственна особенность, которая не проявляется 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 же разность эпох составляет всего 3 года, можно сказать, что собственные движения звезд, 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

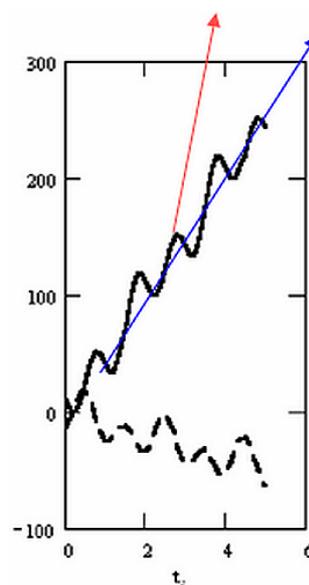


Рис. 4 «Мгновенные» собственные движения звезд

возникнуть различия собственного движения звезды, определенного наземным способом (голубая стрелка на рис. 4), по сравнению с космическим (красная стрелка). Сравнение собственных движений наземных каталогов с данными космических каталогов может помочь в поисках звезд с темными спутниками.

На аппарате Hipparcos наблюдалось около 1 млн. звезд по небольшому числу раз (2-3 наблюдения за весь период). Эти наблюдения легли в основу каталога Tycho. Но надежность данных первого каталога Tycho сразу же вызвала нарекания. По одному разу, аппарат Hipparcos пронаблюдал около 3 млн. объектов. Это обстоятельство подтолкнула астрометристов к замечательной идее, приведшая к созданию Tycho-2 – каталога нового поколения (Хёг и др, 2000). Новизна этого каталога определяется тем, что для вывода собственных движений звезд 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 с точностью около 2.5 мсд/год, а также двухполосную фотометрию 2.5 миллионов звезд (рис. 5). Каталог почти полный до звездной величины  $11.5^m$  (Цветков, 2015 (2)).

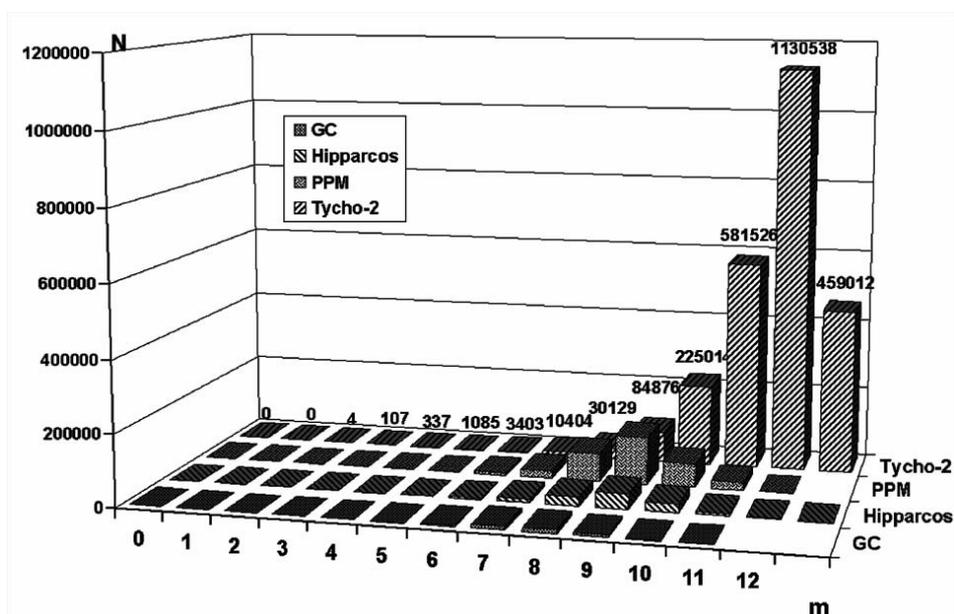


Рис. 5. Сравнение числа звезд каталогов GC, Hipparcos, PPM и Tycho-2

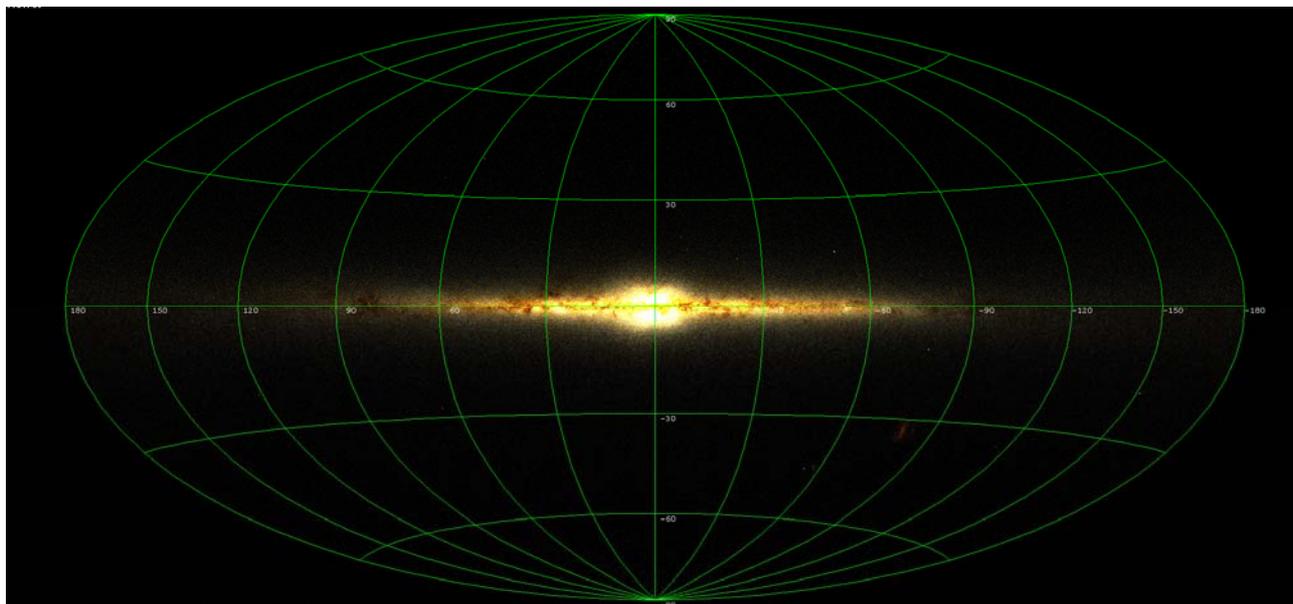
Этот каталог сыграл большую роль в различных кинематических исследованиях и являлся лучшим по точности собственных движений звезд вплоть до появления релизов каталога GAIA.

Интересно, что Гейдельбергском астрономическом институте выпустили очередной каталог серии FK – FK6, который является комбинацией данных FK5 и Hipparcos (Вилен и др., 1999 и 2000).

### **Массовые астрометрические каталоги начала XXI века**

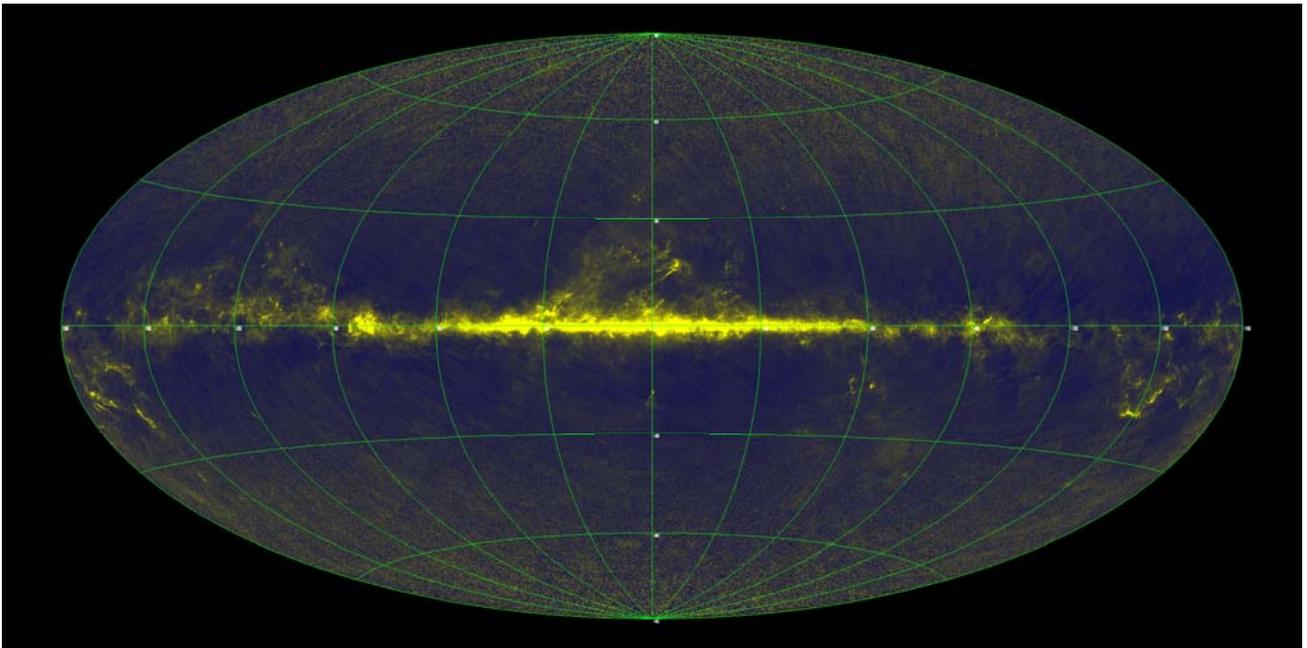
Если изначально точность положений звезд в Hipparcos составляла около 1 мсд на 1991 г., то за прошедшие уже 30 лет из-за ошибок в собственных движениях порядка 1 мсд/год точность каталога деградировала до 30 мсд. Вследствие этого необходимы были новые наблюдения и новые каталоги. Повсеместное внедрение компьютерных методов обработки, сопоставление разных наблюдательных каталогов привело в начале XXI века к появлению массовых звездных каталогов немыслимых ранее объемов, содержащих около 1 млрд. записей. Поскольку эти каталоги в своей массовости предвещают появление космического каталога такой же мощности, мы считаем необходимым познакомить с ними читателя.

Первым массовым каталогом можно считать **NOMAD** (The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset), ставшим доступным астрономической общественности в 2004 году (Захарьяс и др., 2004). Каталог содержит свыше 1 млрд. объектов. В 2004 году еще были определенные технические сложности с хранением данных такого объема в обычной лаборатории или дома. Каталог занимает около 100Г, хранится в 1800 отдельных файлах, а формат каждой величины (координаты, собственные движения, звездные величины) – бинарный целочисленный, что обеспечивает высокую скорость его считывания. Тем не менее, даже простейшая обработка такого каталога целиком занимает свыше часа на современном персональном компьютере. Если вам необходимо решать такие задачи разово, то это терпимо, а при постоянной работе с данными такого объема следует подумать о системе распределенных вычислений. Сверхвысокая плотность звезд в таких каталогах позволяет ставить и решать задачи, которые ранее были не мыслимы. Например, можно исследовать структуру всей Галактики в обширных областях, а не в околосолнечном пространстве. На рис. 4 показано распределение звезд каталога NOMAD по небесной сфере в проекции Айтоффа (Снайдер, 1993). Цвет звезд подобран искусственно, путем сопоставления инфракрасным звездным величинам H, J, Ks цветовых компонент RGB-модели. Изображение на рис. 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.



**Рис. 6.** Звезды каталога NOMAD в проекции Хаммер-Айтоффа  
визуализация инфракрасных звездных величин в видимый диапазон

Высокая плотность звезд позволяет исследовать распределение пылевой материи. Нанесем на карту не сами звезды, а лишь средний показатель цвета всех звезд, попадающих в конкретный пиксель изображения, а это десятки тысяч и более звезд (рис. 7). Полученное изображение отчетливо показывает «покраснение» цвета, вызванного в распределение основной пылевой материи.



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



**Рис. 8.** Окрестности звездного скопления M13, полученные по данным NOMAD.

Наконец, с помощью каталогов такой мощности можно исследовать и небольшие области, но очень подробно. На рис. 8 показаны окрестности шарового звездного скопления M13 по данным каталога NOMAD. Еще раз обращаем внимание читателя, что это не фотография, а построенное компьютерным способом изображение.

При всех достоинствах каталога, лишь 340 млн. звезд (!) имеют данные о собственных движениях, и их точности очень неоднородны. Поэтому сейчас используют массовые каталоги следующего поколения. Они немного меньше NOMAD, но значительно более точные.

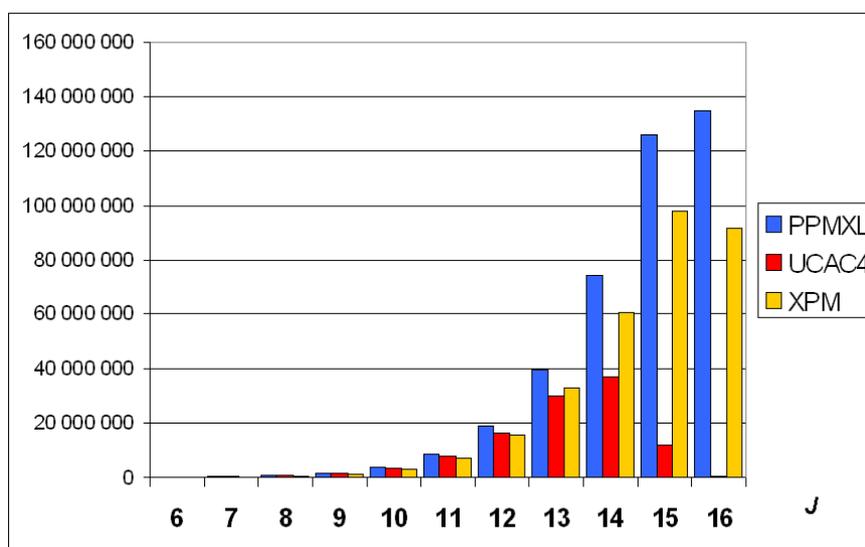
Каталог UCAC4 (Захариас, 2013) содержит 113 млн. звезд от 8 до 16 звездной величины. Ошибки собственных движений звезд составляют от 1 до 10 мсд/год. Каталог содержит фо-

тометрические данные из проекта **2MASS** – инфракрасного наземного каталога 437 млн. объектов, содержащего положения и звездные величины в трех полосах H, J, Ks, но не имеющего данных о собственных движениях звезд (Скрутски, 2006).

Каталог **PPMXL** (Рёзер и др., 2010) – самый массовый – содержит около 900 млн. звезд, и, по-видимому, полный до 20 звездной величины. Точность собственных движений оценивается от 4 до 10 мсд/год. Однако практическая работа с этими данными показывает, что фактическая точность в несколько раз ниже. Каталог содержит фотометрические данные в 6 полосах: двух видимых и четырех инфракрасных, но не для всех звезд есть все данные.

Оба эти каталога основаны большей частью на данных Военно-морской обсерватории США (USNO), а также используют данные свыше 140 других звездных каталогов.

Каталог **XPM** (Федоров и др., 2009) построен путем объединения данных 2MASS и наблюдательного каталога USNO-A2.0, что позволило получить положения и собственные движения для 314 миллионов звезд в диапазоне звездных величин от 10<sup>m</sup> до 20<sup>m</sup>. Алгоритм вычисления собственных движений построен так, что они «абсолютизированы» относительно галактик (которые находятся на таких расстояниях, что на сегодняшнем уровне точности их собственные движения не заметны). Это позволил сделать каталог 2MASS, которые помимо звезд содержит еще положения около 1 млн. так называемых протяженных объектов, большая часть из которых – галактики.



**Рис. 9.** Распределение звезд массовых звездных каталогов по звездной величине J (только те звезды, у которых есть эти фотометрические данные).

Эти три каталога на сегодняшний день являются самыми массовыми и точными астрометрическими каталогами наземной астрометрии. Сравнение их показывает некоторые систематические различия между ними (Витязев и др., 2016). Вообще говоря, сравнение данных разных каталогов – классическая астрометрическая задача, позволяющая оценить точность и уровень ошибок каталогов. Ошибки в данных бывают двух видов: случайные и систематические. Если влияние первых можно уменьшить путем массовости, то вторые – более опасные. Систематические ошибки (т.е. такие, которые имеют вид какой-либо функциональной зависимости от координат, блеска звезды) могут быть ошибочно интерпретированы как реальные кинематические эффекты. Выявление систематических ошибок – одна из важнейших задач наблюдательной астрометрии (Витязев, Цветков, 2016).

## Космическая миссия GAIA

### Космический аппарат

Уже на первом обсуждении результатов миссии Hipparcos было принято решение о следующей. Планировалось несколько вариантов, но финансовую поддержку получил по проект GAIA – Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (ESA Gaia Science Community). Аппарат был запущен 19 декабря 2013 года и до сих пор работает на орбите. Стоимость всего проекта, включая обработку данных, приближается к 1 млрд. евро.

Принципиально аппарат похож на Hipparcos. Так же как и он GAIA будет измерять дуги (угловые расстояния) между объектами. Оптическая схема телескопа состоит из двух зеркальных телескопов с размером основных зеркал (M1, M1) размером примерно полтора на пол метра (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 GAIA вообще не использует входной каталог (Турон и др., 1992), который уточняется наблюдениями – это обычная практика классических наблюдений. В GAIA идентификация и классификация объектов происходит прямо на борту аппарата. В фокальной плоскости размещена, по-видимому, самая большая ПЗС-матрица (точнее мозаика из матриц) в мире (рис. 11) (ESA GAIA Spaceraft summary, 2011).

Космический аппарат находится в точке Лагранжа L2, таким образом, чтобы он никогда не попадал в тень Земли (рис. 12). Аппарат никогда не отдаляется от точки L2 на расстояние свыше 1 км, для обеспечения заданной точности наблюдений его координаты должны быть известны 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 период наблюдений (рис. 14). Это даст возможность определить координаты объекта с точностью 10 микросекунд дуги (мксд) и собственные движения с точностью 10 мксд/год. Следует понимать, что GAIA сканирующий аппарат, поэтому невозможно навестись на конкретный объект и невозможно изменить план наблюдений.

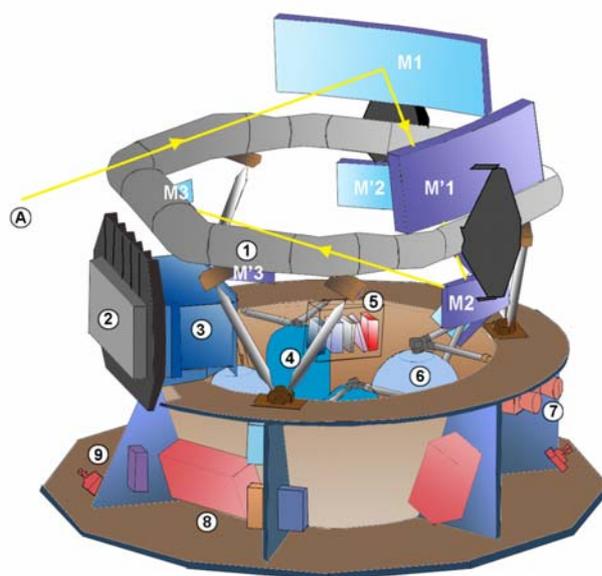


Рис. 10. Схема телескопа GAIA.

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 решетки спектрографа, 6 – топливный бак,  
7 – звездный датчик, 8 – электроника и батареи, 9 – главная энергетическая установка

Помимо астрометрических данных аппарат 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 (что в принципе не было реализовано на Hipparcos) и параметров звездных атмосфер (ESA, Focal plane). Фотометры также позволяют построить кривые блеска переменных звезд.

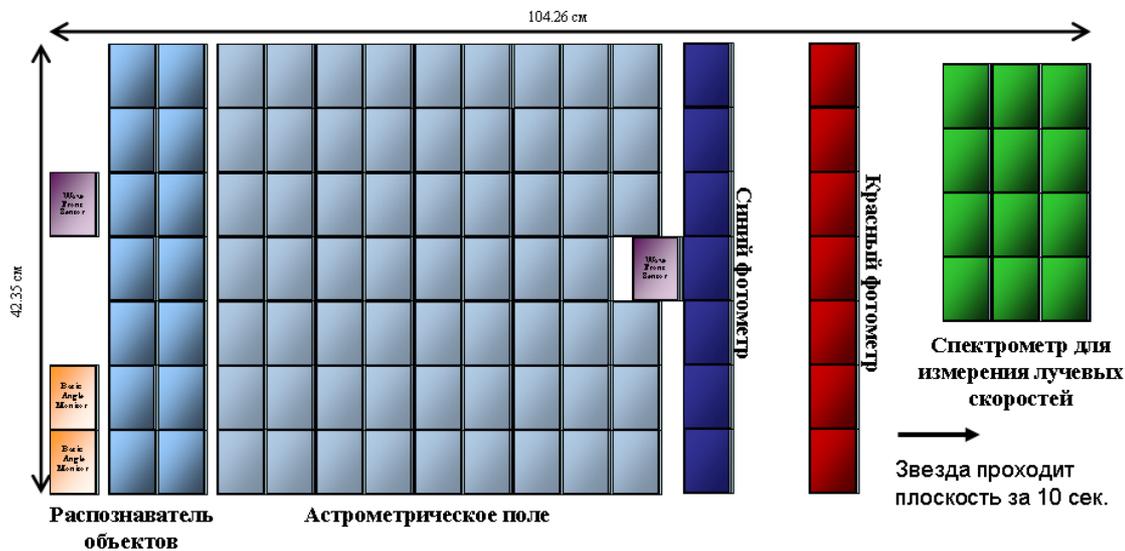


Рис. 11. Мозаика ПЗС-матриц в фокальной плоскости телескопа

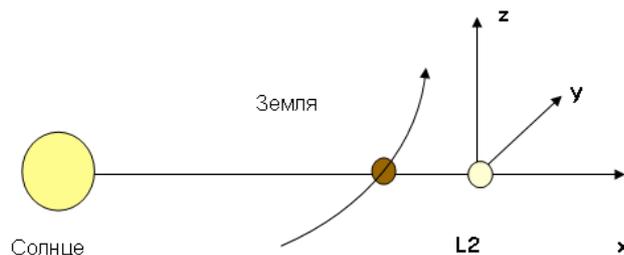


Рис. 12. Местонахождение аппарата – точка L2.

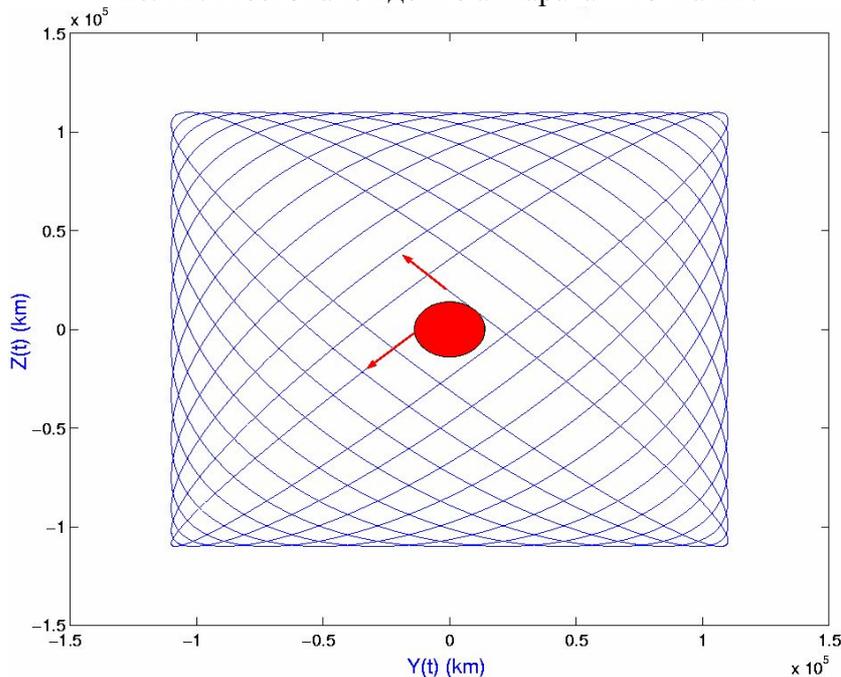


Рис. 13. Орбита аппарата относительно точки Лагранжа L2.

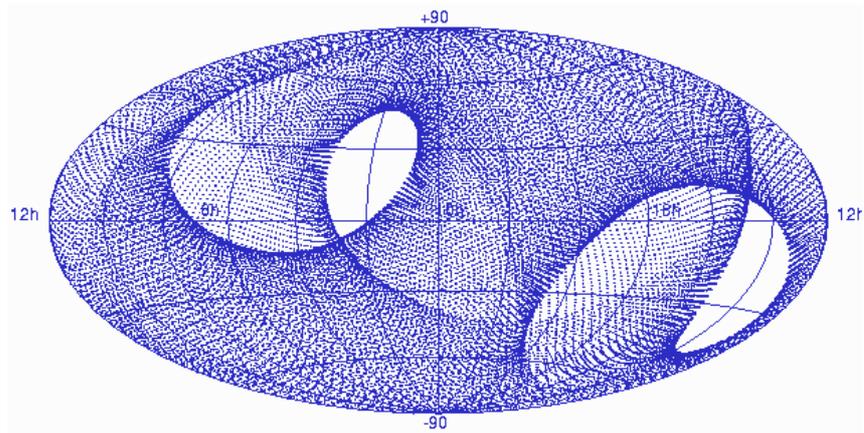


Рис. 14. Сканирование небесной сферы за интервал 100 дней.

После произведения вычислений для каждой звезды будет получена ее траектория на небесной сфере. Пример такой траектории приведен на рис. 15. В нем отчетливо видно параллактический эллипс, а его смещение за несколько лет позволяет оценить собственное движение звезды.

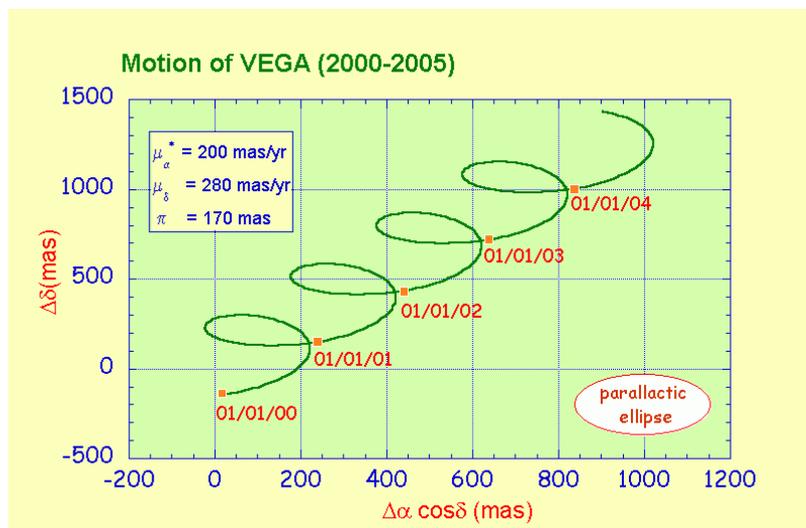


Рис. 15. Пример траектории звезды.

## Проект GAIA в числах

Финальная версия каталога будет содержать свыше 1 млрд. объектов (предварительные результаты уже показали, что даже 1.6 млрд). Из них  $10^6$  звезд, ярче  $12^m$  будут иметь точность определения положений около 4 мксд (0.004 мсд).  $30 \cdot 10^6$  звезд, ярче  $15^m$  – точность 10 мксд, все звезд слабее, но ярче  $20^m$  – точность не менее 150 мксд.

Плотность покрытия будет составлять от 25 тыс. звезд до 3 млн. звезд на квадратный градус вблизи галактического экватора.

Будут определены лучевые скорости 200 млн. звезд (но на сегодняшний момент – только 7 млн.). Точность лучевых скоростей ярких звезд ( $V < 15^m$ ) ожидается на уровне 1–2 км/с, более слабых 5–10 км/с (ESA, Radial Velocity with Gaia, 2019).

Будет произведен анализ переменности порядка 100 млн. звезд, определены массы около 10 тыс. звезд и обнаружены экзопланеты на расстояниях до 200 пк. В Солнечной системе будут произведены наблюдения 500 тыс. малых планет. А на космологических расстояниях ожидается открытие (!) 500 тыс. новых квазаров.

Проект GAIA представляет собой сложнейшую вычислительную задачу. На полную обработку всех данных потребуется 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 тоже астрономический – это поиск внеземных искусственных сигналов в радионаблюдениях с помощью распределенных вычислений – программа SETI (Гиндилис, 2000). Если бы потребовалось затратить всего 1 с времени на обработку одного объекта, но нам пришлось бы ждать 30 лет до выхода финального каталога. Прямой Фурье-анализ всех переменных звезд занял бы 100 лет, если бы он 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. Мадрид. Полный объем переданных с космического аппарата «сырых» данных оценивается в 250 Тбит, распакованные данные займут 150 Тбайт, а рабочие копии, архивы, тесты – 1 Пбайт (Gaia Data Processing and Analysis Consortium).

## Общая теория относительности в GAIA

Для достижения точности на уровне уже в доли мсд требуется применять релятивистские небесно-механические модели и модели распространения света (Кроста и Веккиато, 2010). Использование ньютоновской модели приведет к ошибкам в астрометрических данных. Релятивистская модель наблюдения включает:

1. Моделирование релятивистской абберации (Прети и де Феличе, 2010).
2. Учет релятивистских эффектов в движении спутника вплоть до поправок уровня 0.6 мм/с!
3. Релятивистские эффекты в распространении света. Учет монопольного гравитационного поля всех больших планет и некоторых их спутников. Учет квадрупольного поля планет-гигантов (т.е. учет несферичности гравитационных полей!). Влияние движения тел. (Клионер, 2001)
4. Релятивистские эффекты в движении малых тел Солнечной системы.
5. Релятивистские эффекты в движении звезд (эффект Рёмера, микролинзирование).

Долгое время Общая теория относительности оставалась дисциплиной скорее теоретической, либо использовавшейся при описании экстремальных объектов (нейтронных звезд, черных дыр). Но высокоточные наблюдения перевели Общую теорию относительности в разряд практических дисциплин. Без учета релятивистских эффектов точности в микросекунды дуги не достижимы. Следует сказать, что релятивистская модель распространения света в Солнечной системе использовалась уже при обработке данных Hipparcos (The Hipparcos & Tycho Cat., V. 3)

## Научные задачи GAIA

Миссия GAIA исследует широкий спектр научных задач. Краткое их перечисление уже составит внушительный список:

1. Картирование Галактики.
2. Физика звезд (классификация, светимость, эффективные температуры, индекс металличности)
3. Кинематика и динамика Галактики.
4. Калибровка шкалы космических расстояний.
5. Уточнение возраста Вселенной.
6. Распределение темной материи в Галактике (микролинзирование, наблюдения «коричневых» карликов).
7. Построение фундаментальной системы отсчета, связь радио и оптической систем через прямое наблюдение квазаров.

8. Проверка Общей теории относительности.
9. Уточнение модели Солнечной системы.

Особо следует остановиться на задаче калибровки шкалы расстояний (Турон и др., 2012). Как уже обсуждалось в начале статьи, расстояние – самый сложный для наблюдения параметр. Метода оценки расстояний до галактик, и, в конечном счете, масштаб всей Вселенной определяется тем, насколько точно мы знаем расстояние до цефеид, насколько надежна получена зависимость «период – светимость». Для калибровки шкалы расстояний будут выполнены следующие исследования:

1. Параллаксы до цефеид, находящихся ближе 3 кпк, будут известны с точностью лучше 1%. С точностью не хуже 4% будут промерены расстояния до всех цефеид в Галактике.
2. Параллаксы для переменных типа RR Lyg, находящиеся ближе 3 кпк, также будут промерены с точностью 1%. Остальные звезды этого типа будут иметь ошибку параллакса не превосходящую 10%.
3. Параллаксы мирид в Галактике будут иметь относительную ошибку не более 6%.
4. Параллаксы индивидуальных звезд в 20 шаровых звездных скоплениях будут измерены с точностью 10%, а средние расстояния до всех шаровых скоплений будут на уровне 1%.
5. Аппарат GAIA «достанет» даже до Магеллановых облаков. Параллаксы цефеид в нем будут известны с точностью 30%. Можно будет ответить на вопрос: «одинакова ли зависимость период–светимость для цефеид в нашей Галактике и в других галактиках».

## Предварительные результаты миссии

В 2016 году был выпущен так называемый первый релиз каталога GAIA – GAIA DR1 (Браун и др., 2016). Он содержал 1 140 622 719 звезд, для которых были приведены только координаты, и особое подмножество TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution, 2 057 050 звезд точностью около 0.3 мсд), являющееся комбинацией каталогов Hipparcos, Tycho-2 и данных GAIA. В составе набора DR1 также зафиксированы кривые блеска около 3 тыс. цефеид и звезд типа RR Лиры. Уже первый релиз позволил связать систему каталога с ICRF (Миньяр и др., 2016). С подмножеством TGAS проводились исследования кинематики Галактики и в нашей стране (Витязев<sup>2</sup> и др. 2018).

25 апреля 2018 г. увидел свет второй релиз – GAIA DR2 (Браун и др., 2018). Он содержит уже значительный объем данных, полученных исключительно на космическом аппарате (табл. 3). Однако по заявлению авторов (Лури и др, 2018) использовать индивидуальные параллаксы пока следует с большой осторожностью. У очень большого числа звезд параллакс даже отрицательный. На рис. 16 представлено распределение параллаксов полумиллиона квазаров (он должен быть нулевым), но, как мы видим, разброс параллакса для этих объектов составляет  $\pm 5$  мсд. В силу этого, непосредственно построение диаграммы Герцшпрунга-Рессела дает весьма размытую картину (левая часть рис. 17), а если воспользоваться усредненными данными о расстоянии для звезд, принадлежащих рассеянному скоплению, то картина становится более четкой (правая часть рис. 17). На этих диаграммах впервые использован показатель цвета  $G_{BP}-G_{RP}$  из разности звездных величин, определенных на аппарате, а не из наземных источников (ESA, Gaia Collaboration, 2018).

Во второй половине 2021 года ожидается появления третьего релиза каталога (Gaia Early Data Release 3). В нем ожидается около 1.5 млрд. звезд, имеющих все 5 астрометрических параметра вплоть до звезд  $21^m$ . Для такого же количества звезд будет представлена улуч-

---

<sup>2</sup> Одна из последних работ зав. каф. астрономии, директора астрономического института СПбГУ, доктора физ.-мат. наук, профессора В.В.Витязева (1943–2018).

шенная двуполосная фотометрия, при этом утверждается, что фотометрическая система DR3 будет отличаться от DR2.

Выход первой финальной версии (будут и последующие), в которой будут полностью реализованы заявленные точности, намечен на 2022 год.

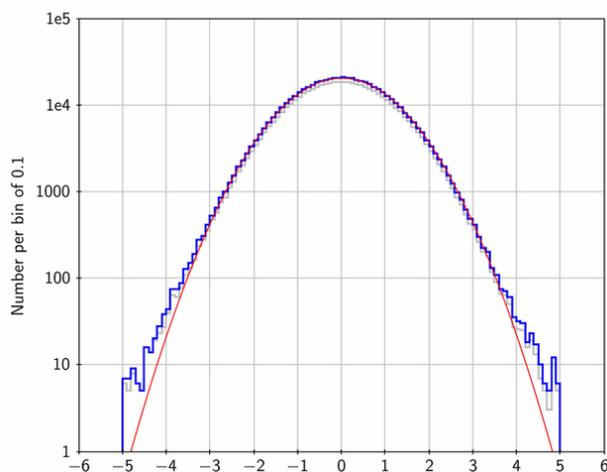


Рис. 16. Распределение параллаксов 556 849 квазаров по данным GAIA DR2.

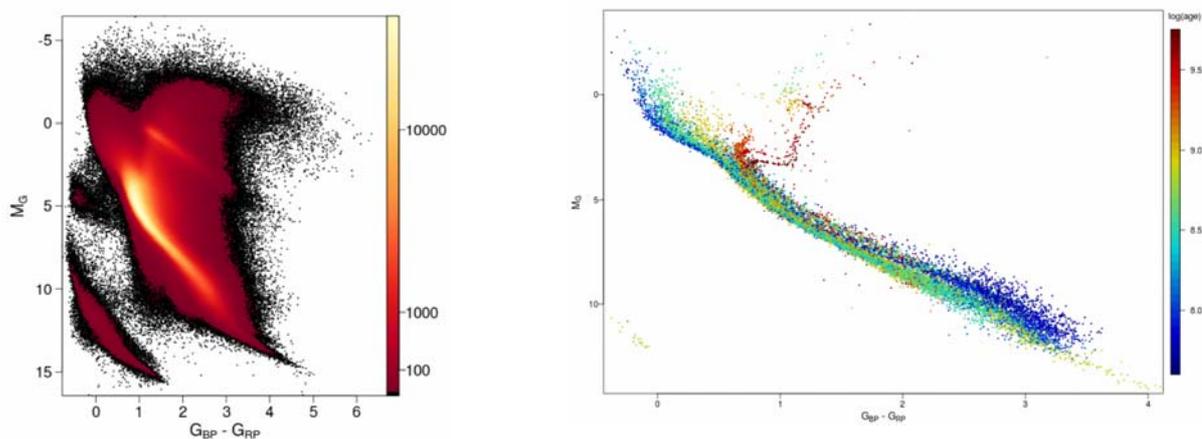


Рис. 17. Диаграммы Герцшпрунга-Рессела для всех звезд и для 32 рассеянных звездных скоплений по данным GAIA DR2.

Таблица 3. Сравнение релизов каталога GAIA.

	DR3	DR2	DR1
Общее количество источников	$\approx 1\,800\,000\,000$	1 692 919 135	1 142 679 769
Количество источников с 5 параметрами	$\approx 1\,500\,000\,000$	1 331 909 727	2 057 050
Количество источников с 2 параметрами	$\approx 300\,000\,000$	361 009 408	1 140 622 719
Источники со средней величиной G	$\approx 1\,800\,000\,000$	1 692 919 135	1 142 679 769
Источники со средней $G_{BP}$ фотометрией	$\approx 1\,500\,000\,000$	1 381 964 755	-
Источники со средней $G_{RP}$ фотометрией	$\approx 1\,500\,000\,000$	1 383 551 713	-
Источники с лучевыми скоростями	не известно	7 224 631	-
Переменные источники	не известно	550 737	3 194
Известные астероиды с данными эпохи	не известно	14 099	-
Эффективные температуры ( $T_{\text{eff}}$ )	не известно	161 497 595	-
Источники с радиусом и светимостью	не известно	76 956 778	-

## Ссылки

1. Ариас и др. (Arias E. F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J.-F.). The Extragalactic Reference System of the International Earth Rotation Service, ICRS, *Astron. Astrophys.*, 303, (1995)
2. Браун и др. (A. Brown et al.). Gaia Data Release 1. *Astron. & Astroph. V. 595*, (2016)
3. Браун и др. (A. Brown et al.). Gaia Data Release 2. *Astron. & Astroph. V. 616*, (2018)
4. Ван Альтена (F. van Altena, Jessica T. Lee, Dorrit Hoffleit) Yale Trigonometric Parallaxes Preliminary (van Altena+ 1991)
5. Вилен и др. (Wielen, R., Schwan, H., Dettbarn, C., Lenhardt, H., Jahreiß, H., Jährling, R.). Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part I: Basic Fundamental Stars with Direct Solutions. *Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg*, No. 35 (1999)
6. Вилен и др. (Wielen, R., Schwan, H., Dettbarn, C., Lenhardt, H., Jahreiß, H., Jährling, R., Khalisi, E.). Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part III: Additional Fundamental Stars with Direct Solutions, No. 37 (2000)
7. В.В.Витязев. Успехи астрометрии. Журнал "Планетарий" (Общество «Знание» России, №22 (1999)
8. Витязев и др. (Vityazev V, Tsvetkov AS, Petrov SD, Trofimov DA). Comparison of XPM and UCAC4 catalogues in the Galactic coordinate system. *Astron. Nachr./AN*, DOI: 10.1002/asna.201613220 (2016)
9. Витязев и др. (V. V. Vityazev et al.). Kinematics of stars from the TGAS (Gaia DR1) Catalogue. *Astron. Letters*, Vol. 44, No. 4, pp. 236–247. (2018)
10. Витязев В.В. и др. Небесные и земные координаты. Учебное пособие по астрометрической практике. Изд. СПбГУ, 2011
11. Витязев, Цветков (V. V. Vityazev and A. S. Tsvetkov). Comparisons of the Galactic coordinate frames realized by the catalogues PPMXL and UCAC4. *MNRAS*, Vol. 461, № 3 (2016).
12. Володаров В. П. Добросовестный наблюдатель. *Вестник РАН. М.*, т. 66, № 12 (1996).
13. Гиндилис Л. М. SETI в России: последнее десятилетие XX века, *Земля и Вселенная*, № 5. С. 39-48; № 6. С. 64-72 (2000)
14. Захариас и др. (Zacharias, N.; Monet, D. G.; Levine, S. E.; Urban, S. E.; Gaume, R.; Wycoff, G. L.). The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD). *American Astronomical Society Meeting 205*, id.48.15; *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 36, p.1418 (2004)
15. Захариас и др. (Zacharias N. et al.). The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4), *Astronomical Journal* 145(44), (2013).
16. Киселев, А.А.. Собственные движения "неподвижных" звезд и их значение в астрономии. *Соросовский образовательный журнал* (2002)
17. Клионер С. (Klioner, Sergei). A Practical Relativistic Model of Microarcsecond Astrometry in Space. *The Astronomical Journal*. 125. 10.1086/367593 (2001).
18. Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино: Век 2, (2004).
19. Кроста и Веккиато (M. Crosta and A. Vecchiato). Gaia relativistic astrometric models, *Astron. & Astroph. 509*, A37 (2010)
20. Лури и др. (X. Luri et al.) Gaia Data Release 2 – Using Gaia parallaxes, *Astron & Astroph.*, V. 616, (2018).
21. Матвеевко Л. И. История РСДБ – становление и развитие. СПб.: Институт прикладной астрономии (2007).
22. Миньяр, (F. Mignard et al.) Gaia Data Release 1: Reference frame and optical properties of ICRF sources. *Astron & Astroph.*, V. 595 (2016)
23. Перриман (M. Perryman) The History of Astrometry, *European Physical Journal* (2012)
24. Прети и де Феличе (G. Preti and F. de Felice) Relativistic satellite astrometry at  $\mu$ arcsec precision and the measurement of the stellar aberration *Astron. & Astroph. 513*, A68 (2010)
25. Рёзер и Бастиан (S. Roeser and U. Bastian). Catalogue of Positions and Proper Motions. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 74, 449 (1988).

26. Рёзер и др. (Roeser S., Demleitner M., Schilbach E.), , Astron. J., 139, 2440 (2010)
27. Снайдер (John P. Snyder). Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections, pp.130-133, ISBN 0-226-76747-7 (1993)
28. Соколовская З. К. Первые определения звездных параллаксов. К вопросу о приоритете одного открытия. Вестник АН СССР. № 3. (1972).
29. Скрутски и др. (M.F. Skrutskie et al.), The Two Micron All Sky Survey (2MASS) AJ, 131, 1163 (2006)
30. Суше, Фессель-Вернье (Jean Souchay and Martine Feissel-Vernier) (eds.). The International Celestial Reference System and Frame (2014)
31. Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Под ред. Л. И. Матвеевко. М.: Мир, (1989)
32. Турон и др (C. Turon et al.), The Hipparcos Input Catalogue. Astron. & Astroph., 258, 74-81;
33. Турон и др. (Turon, Catherine, Luri, Xavier and Masana, Eduard). Building the cosmic distance scale: from Hipparcos to Gaia, Astrophysics and Space Science, V. 341 (2012)
34. Федоров и др. (Fedorov P., Myznikov A., Akhmetov V.). The XPM Catalogue. Absolute proper motions of 280 million stars. MNRAS, 393, 133, (2009)
35. Фрике и др. (Fricke W., Schwan H., Lederle T.). Veroeff. Astron. Rechen-Institut Heidelb. No. 32 (1988)
36. Хёг и др. (Høg E. et al.) The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightes Stars, Astron. & Astroph., 355, L27 (2000)
37. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos: Учебно-метод. пособие. СПб., (2005).
38. Цветков А.С. Руководство по работе с каталогом Tycho-2: учебно-метод. пособие. СПб., (2005)
39. Шефер (Bradley E. Schaefer). Abstract from the American Astronomical Society meeting in San Diego, California (2005)
40. ESA, Radial Velocity with Gaia (<https://sci.esa.int/web/gaia/-/31367-radial-velocity>)
41. ESA, Gaia Science Community, (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>)
42. ESA, Gaia Collaboration, Gaia Data Release 2. Observational Hertzsprung-Russell diagrams. Astron. & Astroph., V. 616, id.A10 (2018)
43. ESA, GAIA Spacecraft summary (<https://sci.esa.int/web/gaia/-/28820-summary>)
44. ESA, Gaia Early Data Release 3, (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>)
45. ESA, Gaia Data Processing and Analysis Consortium (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac>)
46. ESA. The Hipparcos and Tycho Catalogues. — Noordwijk, the Netherlands: ESA, Publications Division, 1997.
47. ESA, Focal plane (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/focal-plane>)
48. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. V.1 ESA, 1997.
49. The Hipparcos and Tycho Catalogues, V. 3, Chapter 16
50. Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/venice-97-proceedings>