



АССОЦИАЦИЯ ПЛАНЕТАРИЕВ

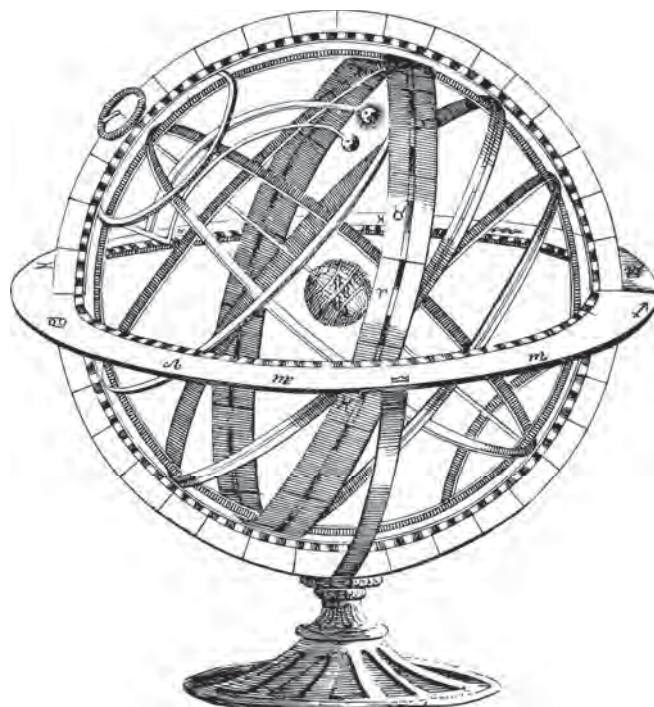


ПРИ ПОДДЕРЖКЕ  
ФОНДА  
ПРЕЗИДЕНТСКИХ  
ГРАНТОВ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ  
**"ШКОЛА ЛЕКТОРОВ ПЛАНЕТАРИЕВ 2022"**  
И УЧЕБНОМУ ФИЛЬМУ  
**"ЗВЕЗДНОЕ НЕБО И ОСНОВЫ  
СФЕРИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ"**

*ЗАЯВКА №: 21-2-011886*



Калуга  
2022

ББК 22.6  
М54

Авторский коллектив

*Составители:*

А.В. Лобанов, Д.О. Фетисов, Е.Н. Типикина  
под научной редакцией Н.Н. Самуся

**М54** Методические рекомендации по материалам конференции «Школа лекторов планетариев 2022» и учебному фильму «Звездное небо и основы Сферической астрономии». — Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»), 2022. — 250 с.: ил.

ISBN 978-5-907460-51-5

ББК 22.6

ISBN 978-5-907460-51-5



9 785907 460515 >

ISBN 978-5-907460-51-5

© Ассоциация планетариев, 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Введение.....   | 5   |
| <i>Д.О. Фетисов</i><br>Звездное небо и основы Сферической астрономии.....   | 9   |
| <i>А.М. Черпащук</i><br>Черные дыры .....   | 37  |
| <i>А.В. Засов</i><br>Как узнали возраст звезд и галактик.....   | 61  |
| <i>Н.Н. Самусь</i><br>Переменные звезды .....   | 66  |
| <i>С.А. Язев</i><br>Проблема астероидной опасности .....  | 80  |
| <i>С.А. Язев</i><br>Солнце и жизнь Земли.....   | 117 |
| <i>А.С. Расторгуев</i><br>Млечный Путь в эпоху миссии GAIA .....  | 147 |
| <i>Д.О. Фетисов, Я.А. Фетисова, А.В. Ивашкина, А.Ю. Алексеев,</i><br><i>под редакцией Е.Н. Титкиной</i><br>Главные достижения в астрономии последних лет..... | 160 |
| <i>Т.М. Ситнова</i><br>Ранние стадии эволюции Галактики .....   | 184 |
| Приложение 1  |     |
| <i>Е.Н. Титкина</i><br>Список некоторых рекомендуемых информационных ресурсов<br>в помощь учителям астрономии и лекторам планетариев .....                    | 200 |
| Приложение 2  |     |
| <i>Е.Н. Титкина</i><br>Знаковые даты 2022 года в астрономии и космонавтики .....  | 211 |

# ВВЕДЕНИЕ

Настоящее методическое пособие, подготовленное в рамках Всероссийской конференции «Школа лекторов планетариев 2022», разработано в помощь учителям астрономии и лекторам планетариев. Содержит ряд методических рекомендаций к некоторым наиболее актуальным темам школьного курса



*Рис. 1. Звездное небо над обсерваторией ГМИК им. К.Э. Циолковского.  
Фото: А. Ивашкина*

«Астрономия», полнокупольным программам для планетариев, связанным с изучением данного предмета. Содержит ряд статей ведущих российских ученых — популяризаторов астрономии, по наиболее животрепещущим вопросам астрономического характера. Включает в себя ряд интересных и полезных приложений, способных стать серьезным подспорьем в работе учителей астрономии и лекторов планетариев.

Астрономия — наука о Вселенной, о строении, движении, происхождении и развитии небесных тел и их систем — это одна из древнейших наук, которая возникла из практической необходимости людей. Со времен глубокой древности и до наших дней астрономия была и является наукой наблюдательной. Уже тогда, много лет назад, анализ видимого расположения светил на небе способствовал развитию естественных наук, прежде всего — физики и математики. Астрономия сейчас дает целостное представление о строении и эволюции Вселенной, ее масштабах. Многие физические теории и по сей день проходят проверку астрономическими наблюдениями. Со временем астрономические знания из разряда чисто научных перешли в разряд обычных атрибутов повседневной жизни человека. Эти знания сейчас используются в большом количестве самых разных отраслей науки и техники, от геологии до космонавтики. С помощью астрономии стало возможным предметно отвечать на вопросы, связанные с астероидно-кометной опасностью, глобальными изменениями климата, проявлениями солнечной активности и т.д. Астрономию можно назвать одной из важнейших наук, определяющих научно-технический прогресс человечества.

Повышение базового уровня астрономической грамотности необходимо для полноценной жизни каждого человека в современном обществе. В настоящее время огромное количество информации порождает разнообразные псевдонаучные представления, с которыми порой сталкиваются учащиеся и учителя. Кроме того, в ряде зарубежных источников не всегда по достоинству оценивается вклад отечественных ученых в

мировую науку. Один из путей решения этих проблем — подготовка методических пособий, полнокупольных программ для планетариев и других материалов, способствующих формированию естественнонаучной картины мира, основанной на достоверных современных знаниях. Создание учебных фильмов, распространяемых на бесплатной основе, и полнокупольных программ, демонстрируемых в планетариях, помогут всесторонне повысить астрономическую грамотность.

После исключения астрономии из обязательного школьного курса и ее последующего восстановлении в 2017 году преподавание этого предмета легло на плечи учителей физики. Процесс подготовки учителей — специалистов в области астрономии был фактически прекращен. При этом, несмотря на то, что школьные предметы «Физика» и «Астрономия» тесно связаны, они имеют ряд характерных различий. Кроме того, астрономические знания непрерывно обновляются, что требует от преподавателей постоянно быть в курсе современных астрономических открытий. Именно поэтому создание новых учебно-методических пособий, включающих в себя методические рекомендации, доклады и статьи ведущих ученых-астрономов; использование современных технологий визуализации, например, связанных с демонстрацией полнокупольных программ для планетариев, особенно способствует повышению квалификации учителей, а также вовлечению учеников в изучение астрономии, развитию у них интереса к познанию Вселенной.

*Изучение астрономии на базовом уровне среднего (полного) общего образования направлено на достижение следующих целей:*

— осознание принципиальной роли астрономии в познании фундаментальных законов природы и формировании современной естественнонаучной картины мира;

— приобретение знаний о физической природе небесных тел и систем, строения и эволюции Вселенной, пространствен-

*ных и временных масштабах Вселенной, наиболее важных астрономических открытиях, определивших развитие науки и техники;*

*— овладение умениями объяснять видимое положение и движение небесных тел принципами определения местоположения и времени по астрономическим объектам, навыками практического использования компьютерных приложений для определения вида звездного неба в конкретном пункте для заданного времени;*

*— развитие познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей в процессе приобретения знаний по астрономии с использованием различных источников информации и современных информационных технологий;*

*— использование приобретенных знаний и умений для решения практических задач повседневной жизни;*

*— формирование научного мировоззрения;*

*— формирование навыков использования естественнонаучных и, особенно, физико-математических знаний для объективного анализа устройства окружающего мира на примере достижений современной астрофизики, астрономии и космонавтики.*

(Стандарт среднего (полного) общего образования по астрономии. Базовый уровень. Приложение к Приказу №506 МИНОБРНАУКИ РОССИИ от 7 июня 2017 года.)

Немаловажно также формирование общей образовательной среды астрономического просвещения, использующей сеть планетариев с современным оборудованием и контентом, включающим в себя полнокупольный видеоматериал, позволяющий визуализировать сложные астрономические темы. Кроме того, современная визуализация в планетариях необходима в связи с ухудшением условий астрономических наблюдений, вызванных влиянием глобализации: укрупнением городов, усилением городской засветки и др.

В настоящее время оказывается активная государственная поддержка, способствующая формированию среды астрономического просвещения, а именно:

- развертывание всероссийской сети планетариев;
- создание полнокупольных программ для планетариев;
- создание учебных и научно-популярных фильмов по астрономии и космонавтике;
- проведение фестивалей и конференций астрономической тематики, например, Всероссийской конференции «Школа лекторов планетариев»;
- создание современных обсерваторий — таких, как астрономическая обсерватория ГМИК им. К.Э. Циолковского;
- организация астрономических кружков при планетариях и учреждениях культуры;
- организация мероприятий, способствующих объединению усилий образовательных организаций, планетариев и музейных комплексов, направленных на поддержку познавательного интереса школьников к изучению астрономии.



# ЗВЕЗДНОЕ НЕБО И ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

**Д.О. Фетисов,**  
заведующий физико-астрономическим отделом  
Государственного музея истории космонавтики  
им. К.Э. Циолковского



*Рис. 1. Планетарий ГМИК им. К.Э. Циолковского. Фото: А. Зарубин*

## Назначение программы

Учебная полнокупольная программа «Звездное небо и Основы сферической астрономии» создана Ассоциацией планетариев и лиц, содействующих их развитию, при поддержке

Фонда президентских грантов в 2022 году. Предназначена для показа в планетариях, оснащенных полнокупольным оборудованием. Также предусмотрен планарный вариант программы для использования в планетариях, не имеющих таких возможностей.

Согласно Приказу №506 от 7 июня 2017 года «О внесении изменений в федеральный компонент государственных образовательных стандартов начального общего, основного общего и среднего (полного) общего образования» в обязательном школьном курсе был восстановлен учебный предмет «Астрономия».

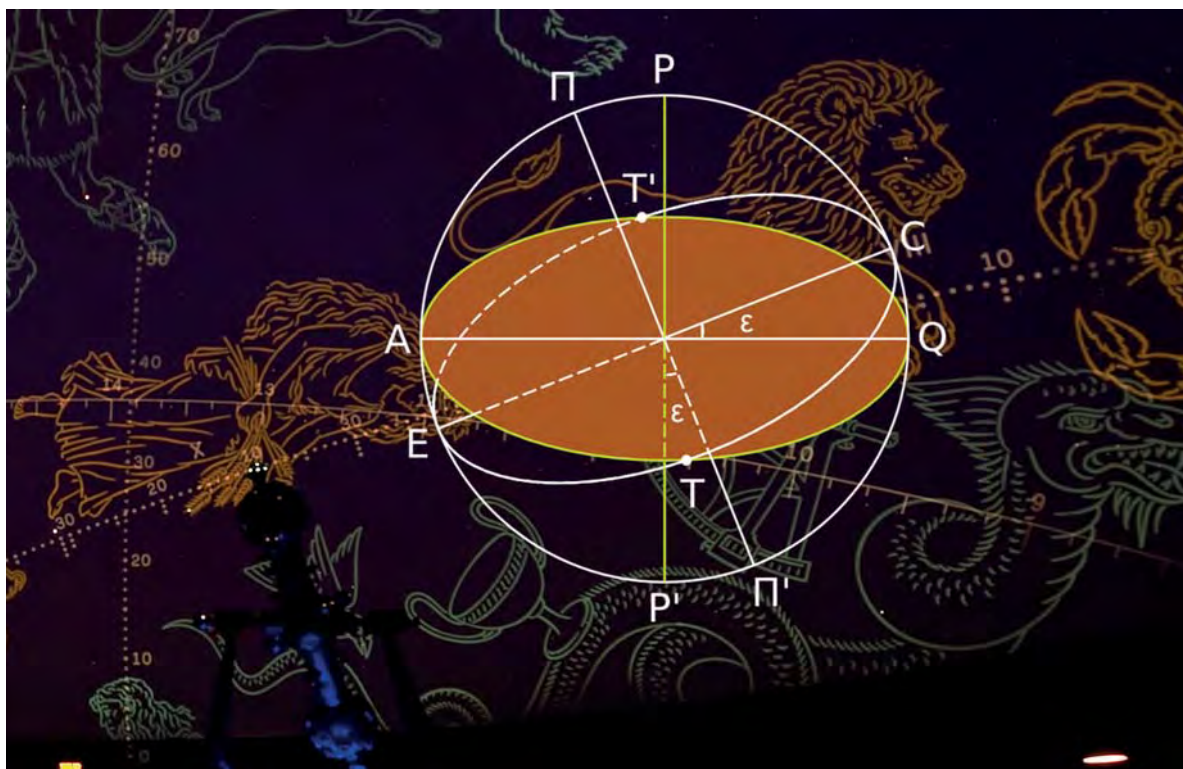
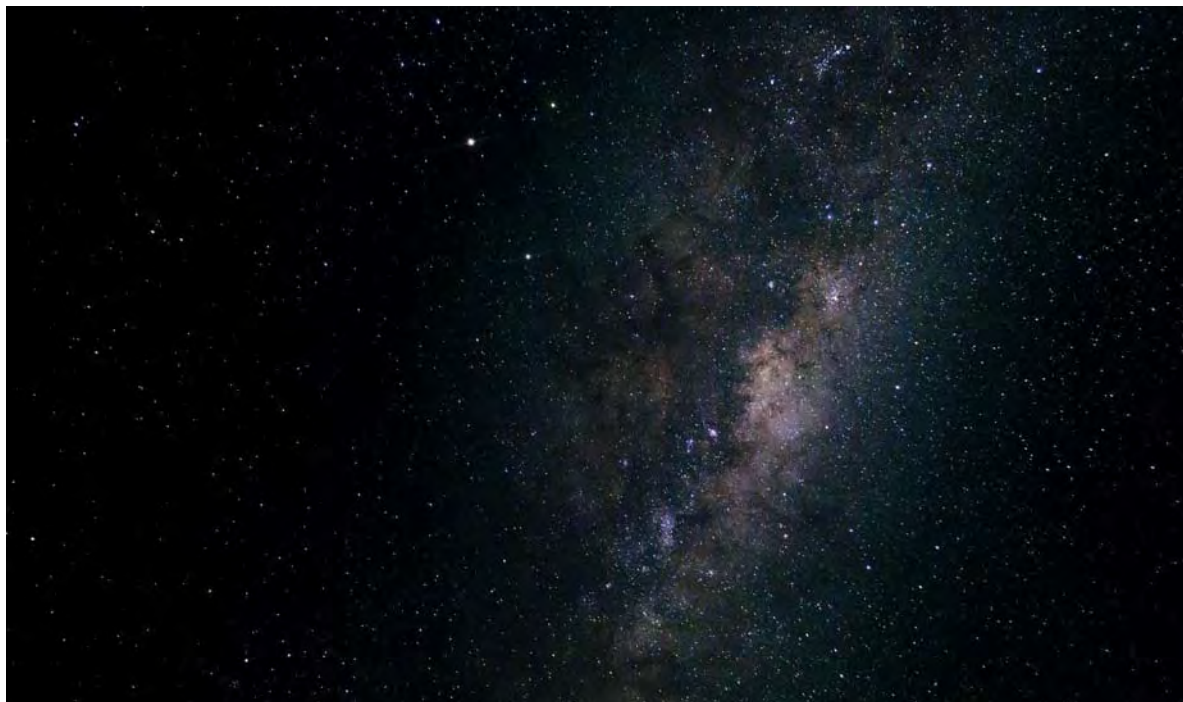
Возможности планетариев всегда использовались как дополнение к школьному уроку по физике и астрономии. Создание учебных полнокупольных программ, таких как данная, позволяет существенно расширить спектр этих возможностей. Визуализация учебного материала в рамках сеансов в планетариях позволяет лучше воспринимать, усваивать и запоминать материал, чем это возможно на обычных уроках в школе. Современные возможности этой визуализации также могут побудить учащихся к дальнейшему изучению Вселенной. Сформировать или развить уже имеющийся интерес к познанию окружающего мира.

Данная программа носит не только учебный характер и может быть использована для изучения курса «Астрономия» в старших классах школы и средних специальных учебных заведениях, но и применима в системе дополнительного образования, например, при проведении астрономических кружков, а также как научно-популярный фильм (планарный вариант программы) для популяризации астрономических знаний.

Программа соответствует Стандарту среднего (полного) общего образования по астрономии. Не является заменой школьному уроку, но дополняет и закрепляет знания, даваемые учителем, прежде всего, за счет полнокупольной визуализации, способствующей образному восприятию материала учащимися.

# Тематика программы

Программа представляет из себя две связанные друг с другом части.



*Рис. 2. Звездное небо и Основы сферической астрономии*

Первая посвящена обзору звездного неба на разных широтах в разное время года. По мнению авторов данный раздел обязателен и необходим по нескольким причинам:

Во-первых, он предваряет рассмотрение подразделов программы, посвященных непосредственно сферической астрономии, позволяя лучше понять их за счет полученных перед этим общих представлений о звездном небе, которые, как показывает опыт, не всегда присутствуют у учащихся.

Во-вторых, данная программа чаще всего является первой в курсе посещения нескольких учебных сеансов планетария (в некоторых случаях — единственной). Так как в других программах (темах), как правило, уделяется незначительное внимание общим представлениям и обзору звездного неба, при первом (в некоторых случаях — единственном) посещении планетария целесообразно в наиболее полной мере остановиться на рассказе о звездах и созвездиях.

В-третьих, традиционно, рассказ о звездах и созвездиях, «эффект реалистичного звездного неба над головой» являются и всегда являлись главными особенностями планетария, позволяющими погрузить зрителя в неповторимую атмосферу, сделать посещение планетария учащимися не только образовательно, но и эстетически ценным.

Вторая часть программы посвящена непосредственно основам сферической астрономии. Объясняются изменения вида звездного неба в течение суток и в течение года. Даются понятия Небесной сферы, Отвесной линии, Зенита и Надира, Линии истинного горизонта. Вводятся понятия Полюсов мира, Оси мира, точек Севера и Юга, заходящих и незаходящих звезд. Рассматривается расположение (и связанные с ним особенности) упомянутых линий и точек на северном полюсе Земли и на ее экваторе.

Вводится и объясняется Горизонтальная система небесных координат. Объяснение сопровождается примерами нахождения горизонтальных координат наиболее ярких звезд. После акцента на неудобствах и особенностях, связанных с использо-

ванием этой системы, вводится и объясняется Экваториальная система небесных координат.

Вводятся понятия Небесного экватора и Эклиптики, точек равноденствия. Экваториальная система рассматривается более подробно. Используются не только примеры нахождения экваториальных координат наиболее известных звезд, но и примеры нахождения звезд по известным координатам.

Вводится понятие Небесного меридиана, объясняется явление Кульминации звезд. Рассматриваются особенности кульминаций Солнца. Дней зимнего и летнего солнцестояний.

Все описанное выше визуализируется с помощью возможностей планетария, а также 3D-модели небесной сферы.

## Использование программы в учебном процессе

Учебный материал, излагаемый в программе, рассредоточен в нескольких параграфах школьного учебника. Учителю можно рекомендовать давать материал не только классическим образом, на уроке, но и использовать, например, в рамках того же урока планарный вариант программы (подготовленный на основе полнокупольного) полностью или частично, в зависимости от необходимости.

Однако, наиболее эффективным явилась бы организация учителем посещения учениками планетария (в случае такой возможности) для просмотра оригинальной полнокупольной версии программы. Перед посещением планетария ученикам может быть дано задание «целенаправленного просмотра», предполагающего обязательные ответы на определенные вопросы, затрагиваемые в программе, по ее разделам. Опрос можно провести на уроке в школе после посещения как в устной форме, так и в форме, например, самостоятельной работы.

Еще более эффективным, а главное, интересным, явилось бы посещение цикла (нескольких) учебных программ плане-



*Рис. 3. Учащиеся на образовательной лекции в планетарии.*

*Фото: А. Бынкин*

тария (также в случае такой возможности), первой из которых целесообразно посмотреть именно полнокупольную программу «Звездное небо и Основы сферической астрономии».

Именно в планетарии учащимся предоставляется уникальная возможность, при которой устное изложение учебного материала сопровождается наглядным и динамичным видеорядом, а также музыкальным аудиосопровождением.

## Основная информация программы

### **Звездное небо. Обзор наиболее известных звезд и созвездий средних широт**

На небе — самая близкая к нам звезда — Солнце. Оно небольшое и неяркое. Этот акцент делается специально для объяс-

нения особенностей наблюдения светила «невооруженным глазом», невозможности смотреть на настоящее Солнце без использования специальных оптических приборов. Заход Солнца как бы в ускоренном режиме позволяет проследить это явление всего за несколько минут.

Для удобства ориентирования по небу еще в древности люди объединили хорошо видимые звезды в особые группы, созвездия. В современную эпоху на небе выделено 88 созвездий.

Рассматриваются наиболее известные созвездия средних широт северного полушария — Большая и Малая медведицы, с акцентом на возможность ориентирования ночью с их помощью: Если мысленно отложить на небе примерно 5



*Рис. 4. Созвездия Большая и Малая медведицы на небе планетария.*

*Фото А. Ивашкина*

расстояний между крайними, наиболее удаленными от ручки, звездами основания Большого ковша по прямой, мы увидим одну из самых известных и самых полезных звезд — Полярную. Встав лицом к Полярной звезде, наш взгляд устремится в направлении на север, сзади от нас будет юг, справа будет располагаться восток, а слева — запад. Полярная звезда расположена на кончике ручки ковша Малой медведицы. Также демонстрируется созвездие Кассиопея с указанием возможности нахождения основы созвездия: основные звезды созвездия Кассиопея напоминают перевернутую букву «М».

### **Звездное небо средних широт в разное время года**

Рассмотренные созвездия видны в наших широтах круглый год. Но есть созвездия, характерные для того или иного времени года.



*Рис. 5. Созвездия Волопас и Большая медведица на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*



Весеннее небо украшает яркая звезда — Арктур из созвездия Волопас.

Демонстрируется способ ее нахождения с помощью Большого ковша: Если мысленно продолжить линию, соединяющую две крайние звезды ручки ковша Большой медведицы вниз к горизонту, мы увидим Арктур, самую яркую звезду в северном полушарии.

Летом и осенью первыми на небе появляются три яркие звезды. Если соединить их мысленно линиями, то получится большой треугольник. Он так и называется: Летне–осенний треугольник.

Его вершины: Вега — главная звезда в созвездии Лира. Альтаир — главная в созвездии Орел. И Денеб — главная в созвездии Лебедь.



*Рис. 6. Созвездия Орел, Лебедь и Лира на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*

Поздней осенью можно наблюдать созвездия Андромеда. Основа созвездия — цепочка из 3 звезд.

Крайняя звезда в этой цепочке — вершина квадрата Пегаса, основы одноименного созвездия. Над средней звездой цепочки в виде небольшого пятнышка можно наблюдать «невооруженным глазом» туманность Андромеды (М31).



*Рис. 7. Созвездия Андромеда и Пегас на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*

В зимнее время в южной части небосвода наилучшим образом можно наблюдать красивое созвездие Орион.

В плече античного героя сияет красный сверхгигант Бетельгейзе, в ноге — бело-голубой сверхгигант Ригель.



*Рис. 8. Созвездие Орион на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*

Наиболее известны в этом созвездии три звезды в центре, как будто расположившиеся в одну линию, — пояс Ориона. Демонстрируется способ нахождения звезд Сириус и Альдебаран: Если мысленно продолжить пояс Ориона вниз к горизонту, мы увидим ярчайшую звезду небосвода — Сириус из созвездия Большой Пес. Продолжив пояс Ориона вверх, мы увидим главную звезду созвездия Телец — Альдебаран.

### **Звездное небо на других широтах**

На Земле не везде можно видеть одни и те же звезды и созвездия. Отправившись, например, на Северный полюс, можно увидеть все звезды и созвездия северного полушария. От-



*Рис. 9. Созвездие Южный крест на небе планетария.*

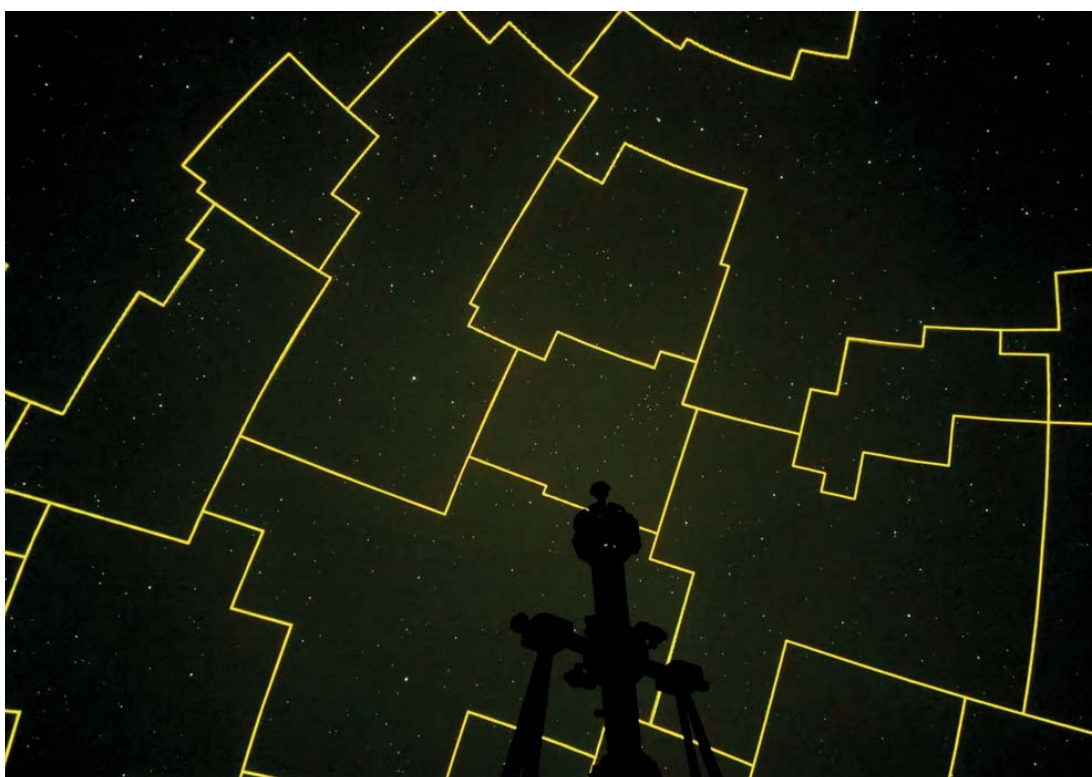
*Фото: А. Ивашкина*

правившись на экватор нашей планеты, если бы можно было наблюдать звезды и днем, мы увидели бы все 88 созвездий и те несколько тысяч звезд, которые может наблюдать человек «невооруженным глазом» в обоих полушариях Земли.

Наиболее известное созвездие на экваториальном небе — Южный Крест.

Рассматривается способ ориентирования с помощью данного созвездия: Если мысленно продолжить большую перекладину креста вниз к горизонту, мы получим направление на юг. Выше Южного Креста расположено большое и выразительное созвездие — Центавр. Именно там находится самая близкая к нам после Солнца видимая звезда Альфа-Центавра.

## Рисунки и границы созвездий



*Рис. 10. Рисунки созвездий и границы созвездий на небе планетария.  
Фото: А. Ивашкина*

В программе делается акцент на разнице между рисунками созвездий, возникающими в воображении людей, и современными границами созвездий. В современной астрономии созвездия — это определенные участки с определенными, четко выраженными границами. Демонстрируются созвездия как в виде воображаемых рисунков, так и в виде участков неба, неправильных многоугольников.

### **Объяснение изменения вида звездного неба**

Земля вращается вокруг своей оси, поэтому мы, находясь на ней, видим звездное небо разным вечером и утром. Мы видим его разным в разное время года, но уже по другой причине. (Смена времен года связана с наклоном земной оси в сочетании с вращением Земли вокруг Солнца.) Как будто гигантская звездная сфера плывет вокруг нас.

### **Небесная сфера**

Небо со звездами над головой, находящимися на разных расстояниях от нас, астрономы заменили воображаемым шаром, на котором светила расположены так же, как и на настоящем небе. Но, в отличие от настоящих звезд, все они находятся на поверхности этого шара, а значит — на одинаковом расстоянии от его центра. Наблюдатель всегда находится в этом центре небесной сферы. Где бы вы ни были, центр небесной сферы для вас всегда находится там же, где находитесь вы.

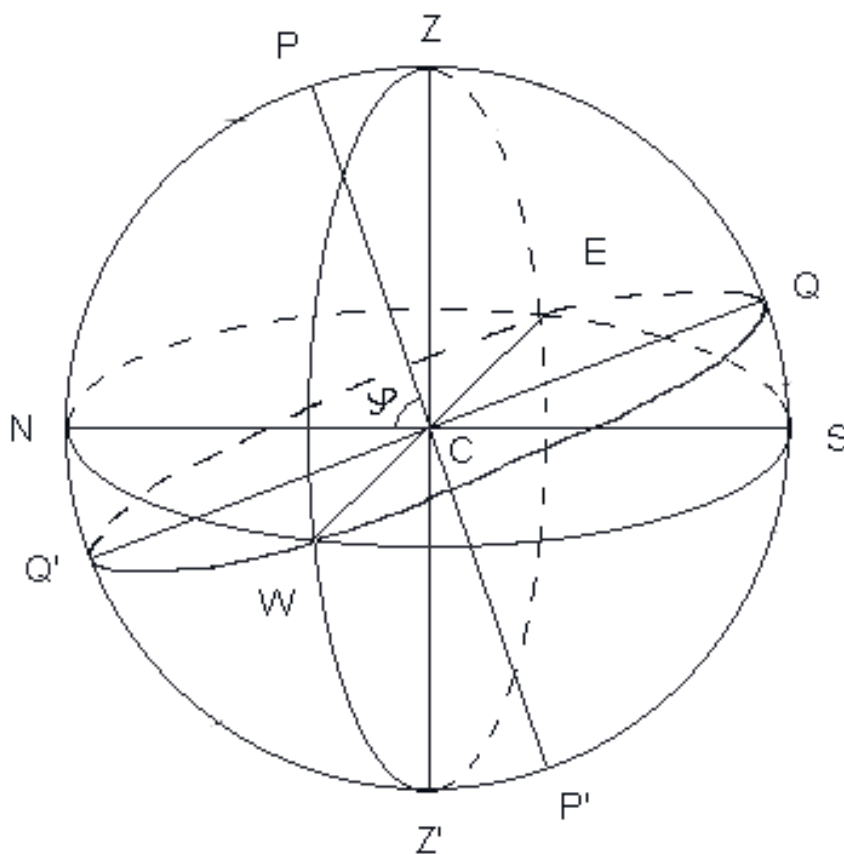


Рис. 11. Схема небесной сферы.

Источник: [www.astronet.ru](http://www.astronet.ru)

### **Отвесная линия. Зенит. Линия истинного горизонта**

Отвесная линия. Прямая, совпадающая в данной точке с направлением силы тяжести. Если бы мы могли подвесить над головой небольшой груз на нити, мы бы и увидели направление отвесной линии. Отвесная линия, проведенная через центр небесной сферы, пересекает ее в двух диаметрально противоположных точках. Верхняя называется Зенитом. Противоположная ей точка на небесной сфере — Надир. В разных точках Земли направление на зенит — продолжение направления от центра планеты к наблюдателю — будет отличаться.

Если провести плоскость перпендикулярно отвесной линии, окружность на небесной сфере, через центр которой проходит эта плоскость, даст нам Линию истинного или математического горизонта.

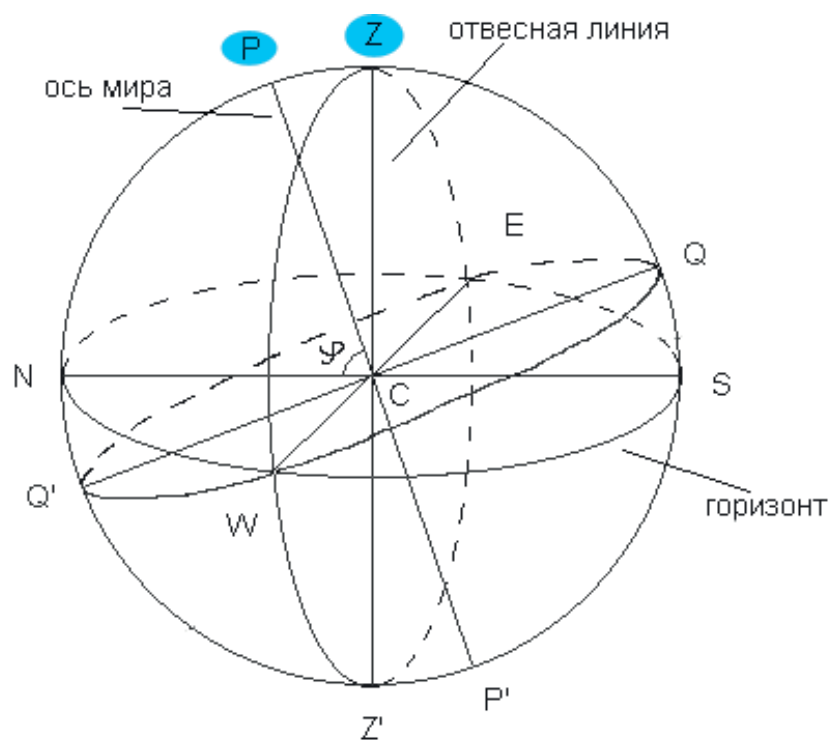


Рис. 12. Схема небесной сферы и Зенит на небе планетария.  
Фото: А. Ивашкина



## **Северный полюс мира. Ось мира. Заходящие и незаходящие звезды**

На небесной сфере есть точка, вокруг которой происходит видимое движение звезд на небе в течение суток. Это Северный полюс мира. Противоположно северному, находится Южный полюс мира.

Линия, соединяющая полюс мира и центр небесной сферы, параллельна оси вращения Земли. Она называется Осью мира. Точка математического горизонта, ближайшая к Северному полюсу мира, называется точкой Севера. Ближайшая к южному полюсу — точкой Юга.

По мере суточного вращения небесной сферы некоторые звезды восходят над горизонтом и скрываются за ним. Они называются заходящими. Но есть светила, которые никогда не заходят за линию горизонта. Это незаходящие звезды. В средних широтах мы можем наблюдать как те, так и другие светила.

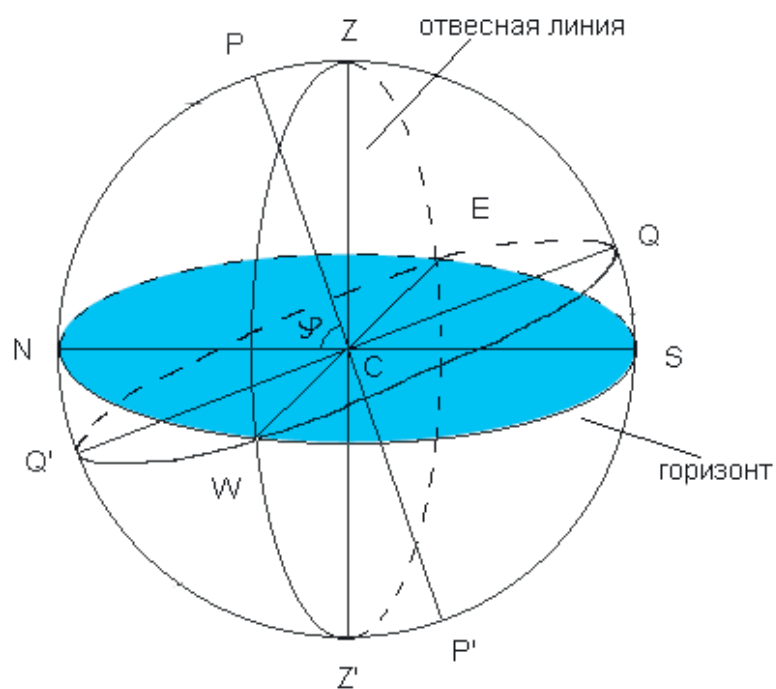
## **Полюс мира, горизонт и географическая широта**

Знание углового расстояния полюса мира от горизонта дает простейший способ определения географической широты местности. Это угловое расстояние равно географической широте.

Например, на экваторе нашей планеты эта величина равна нулю. Северный полюс мира находится в точке Севера на линии горизонта. Ось мира лежит в плоскости горизонта. Поэтому все звезды там заходящие. А на северном полюсе Земли Северный полюс мира совпадает с Зенитом, Ось мира с Отвесной линией. Поэтому там все светила наоборот незаходящие.

## Горизонтальная система небесных координат. Пример нахождения

Что же такое угловое расстояние от горизонта и как вообще определяют положение звезд относительно него? Для этого астрономы используют Горизонтальную систему координат.



*Рис. 13. Схема небесной сферы и Линии на небе планетария:  
круг высоты и круг для определения азимута. Фото: А. Ивашкина*

Это система небесных координат, в которой основной плоскостью является плоскость математического горизонта, а основным направлением — Отвесная линия.

К горизонтальным координатам относятся высота над горизонтом (или в некоторых случаях зенитное расстояние) и азимут. Высота — это угловое расстояние от горизонта до звезды, отсчитываемое по Кругу высоты, мысленной линии, проходящей через светило и зенит. Плоскость, ограниченная этой линией, перпендикулярна плоскости горизонта. Азимут — это угловое расстояние, отсчитываемое к западу от точки юга до пересечения Круга высоты с горизонтом. Для лучшего понимания учащимися целесообразно наглядно, за счет полнокупольной визуализации, найти горизонтальные координаты, например, самой яркой звезды на небе Сириус (обращая внимание на время, дату и широту, на которой рассматривается пример).

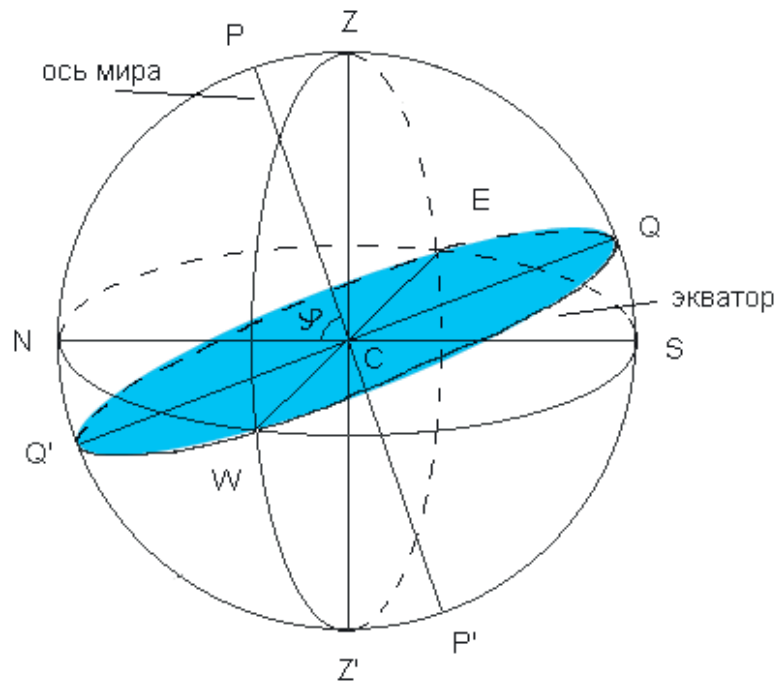
Целесообразно сделать специальный акцент, что горизонтальные координаты меняются с течением времени и зависят от положения наблюдателя. Координаты звезд относительно горизонта, хотя и наглядны, но непригодны, например, для составления звездных карт. Ведь для разных мест Земли горизонтальные координаты светила будут различны. Возможно ли использовать такую координатную систему, подобную системе широт и долгот в географии, где координаты неизменны по мере вращения небесной сферы?

## **Экваториальная система небесных координат. Небесный экватор. Эклиптика**

Небо, как и земной шар, мысленно делится на два полушария Небесным экватором. Если провести плоскость перпендикулярно Оси мира, окружность на небесной сфере, через центр которой проходит эта плоскость, даст нам линию Небесного экватора. Полушарие неба, в котором находится Северный полюс мира, называется северным, а другое полушарие — юж-

ным. В наших средних широтах мы видим значительную часть звезд северного полушария и лишь небольшую часть — южного.

Экваториальная система координат — это система небесных координат, в которой основной плоскостью является плоскость небесного экватора, а основным направлением — Ось мира.



*Рис. 14. Схема небесной сферы и Линии на небе планетария: эклиптика, небесный экватор, круг склонения. Фото: А. Ивашкина*

Экваториальных координат также две. Одна координата аналогична земной широте и называется склонением. Это величина угла между направлением от земного наблюдателя на светило и плоскостью небесного экватора. Определить склонение звезды можно, воспользовавшись Кругом склонения. Он проходит через небесные полюса и звезду. Плоскость, ограниченная этой линией, перпендикулярна плоскости небесного экватора. Склонение к северному полюсу мира от экватора считается положительным, к южному — отрицательным. Вторая координата — прямое восхождение — аналогична земной долготе. Удобно измерять ее в часах и минутах. Она отмеряется вдоль небесного экватора от условно выбранной точки, точки весеннего равноденствия, до пересечения небесного экватора с кругом склонения, проходящим через звезду.

Для того, чтобы понять, что такое весеннее равноденствие, придется остановиться на еще одной важной линии. Это Эклиптика. Именно вдоль этой линии пролегает видимый



*Рис. 15 (а). Эклиптика на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*



*Рис. 15 (б). Эклиптика и ее пересечение с небесным экватором на небе планетария. Фото: А. Ивашкина*

путь, который проходит Солнце в течение года. На самом деле это Земля вращается вокруг нашего светила, но мы видим, как Солнце движется по небу.

### **Точки равноденствия. Примеры нахождения экваториальных координат**

Эклиптика пересекает Небесный экватор в двух точках. Их называют точками равноденствия. Вблизи 21 марта Солнце проходит точку весеннего равноденствия, переходя из южного полушария в северное. У нас, в северном полушарии Земли, начинается астрономическая весна. Осенью, вблизи 23 сентября, в момент осеннего равноденствия Солнце переходит из северного полушария в южное. В северном полушарии начинается астрономическая осень. В дни равноденствия на всей поверхности Земли (исключая районы земных полюсов) световой день почти равен ночи.

Для лучшего понимания учащимися целесообразно наглядно, за счет полнокупольной визуализации, найти экваториальные координаты нескольких известных звезд, а также решить противоположную задачу — зная звезду, найти ее экваториальные координаты.

Целесообразно также сделать наглядный акцент: показать, что экваториальные координаты звезд, в том числе тех, которые рассматривались, не меняются по мере вращения небесной сферы.

### **Небесный меридиан. Кульминации звезд**

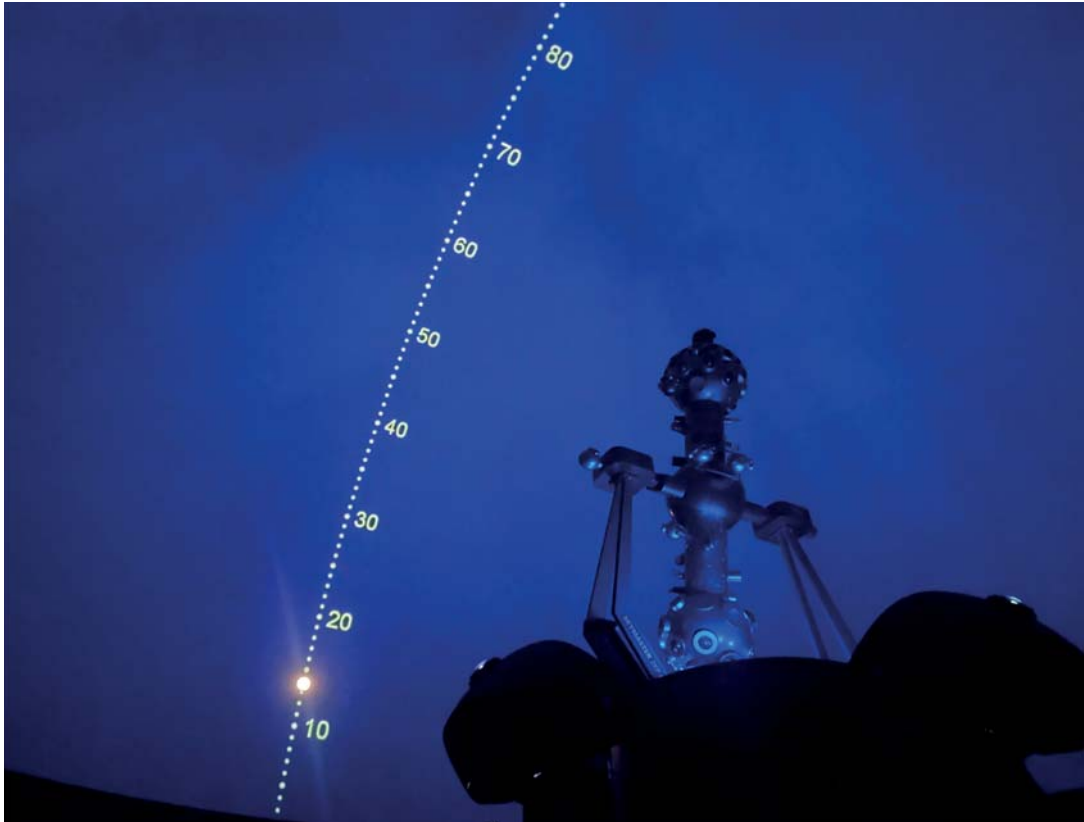
Все звезды в течении суток проходят пути, параллельные Небесному экватору. Где параллели, там и меридианы. Небесный меридиан проходит через небесные полюса и пересекает Линию истинного горизонта в точках Севера и Юга.

В процессе видимого суточного вращения небесной сферы каждое светило пересекает линию Небесного меридиана.



*Рис. 16 (а). Звезды, пересекающие небесный меридиан, на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*



*Рис. 16 (б). Солнце, пересекающее небесный меридиан, на небе планетария.*

*Фото: А. Ивашкина*

Это явление называется Кульминацией звезд. Кульминаций выделяют две. В верхней кульминации высота светила над горизонтом максимальна, в нижней — минимальна. Промежуток времени между этими кульминациями равен полусуткам. У незаходящих звезд обе кульминации видны над горизонтом, у заходящих — нижняя кульминация происходит под горизонтом. В данной местности каждая звезда кульминирует всегда на одной и той же высоте над горизонтом.

### **Кульминации Солнца. Дни летнего и зимнего солнцестояний**

Наше Солнце, как и любое светило, также кульминирует дважды, но, в отличие от других звезд, меняет высоту, на которой кульминирует. Момент верхней кульминации Солнца



называется истинным полднем. В средних широтах вблизи 22 июня Солнце восходит далеко на северо-востоке, заходит далеко на северо-западе. В истинный полдень находится на максимальной высоте над горизонтом. Это происходит в день летнего солнцестояния. Наблюдается самый длинный световой день и самая короткая ночь.

В конце года, вблизи 22 декабря, Солнце восходит на юго-востоке, заходит на юго-западе. В истинный полдень оно находится на минимальной высоте над горизонтом. В день зимнего солнцестояния наблюдается самый короткий световой день и самая длинная ночь.



*Рис. 17. Планетарий ГМИК им. К.Э. Циолковского.*

*Фото: А. Бынкин*

# Глоссарий

**Астрономия** — наука о строении, движении, происхождении и развитии небесных тел и их систем.

**Созвездие** — область неба в пределах некоторых установленных границ.

**Небесная сфера** — воображаемая сферическая поверхность, в центре которой помещается наблюдатель, на которую проецируются небесные светила.

**Отвесная линия** — прямая, пересекающая небесную сферу в точках зенита и надира. Определяется направлением отвеса.

**Зенит** — точка пересечения небесной сферы с отвесной линией над головой наблюдателя.

**Надир** — точка небесной сферы, в которой ее пересекает нижняя часть отвесной линии. Надир диаметрально противоположен зениту.

**Линия истинного или математического горизонта** — окружность на небесной сфере, плоскость которой проходит через ее центр перпендикулярно отвесной линии.

**Полюс мира** — точка на небесной сфере, вокруг которой происходит видимое суточное движение звезд из-за вращения Земли вокруг своей оси.

**Ось мира** — прямая, проходящая через центр небесной сферы параллельно оси вращения Земли.

**Точка севера** — точка математического горизонта, ближайшая к северному полюсу мира.

**Точка юга** — точка математического горизонта, ближайшая к южному полюсу мира.

**Горизонтальные координаты** — система небесных координат, в которой основной плоскостью является плоскость математического горизонта, а основным направлением — отвесная линия.

**Высота над горизонтом** — угловое расстояние небесного объекта над горизонтом наблюдателя.

**Кругу высоты** — линия, проходящая через светило и зенит. Часть плоскости, ограниченная этой линией, перпендикулярна плоскости горизонта.

**Азимут** — измеряемая величина дуги горизонта от точки юга на запад до круга высоты данного светила.

**Небесный экватор** — окружность на небесной сфере, плоскость которой проходит через ее центр перпендикулярно оси мира. Равноудален от северного и южного полюсов мира; параллелен плоскости земного экватора.

**Эклиптика** — видимый путь Солнца на небесной сфере в течение года.

**Точки равноденствия** — две точки небесной сферы, в которых эклиптика пересекает небесный экватор.

**Экваториальные координаты** — система небесных координат, в которой основной плоскостью является плоскость небесного экватора, а основным направлением — ось мира.

**Склонение** — измеряемая величина дуги круга склонения от небесного экватора до данного светила.

**Круг склонения** — линия, проходящая через небесные полюса и звезду. Часть плоскости, ограниченная этой линией, перпендикулярна плоскости небесного экватора.

**Прямое восхождение** — измеряемая величина дуги небесного экватора от точки весеннего равноденствия до круга склонения данного светила.

**Небесный меридиан** — окружность на небесной сфере, плоскость которой проходит через ее центр, отвесную линию и ось мира.

**Кульминация** — явление пересечения светилом небесного меридиана.

**Точки солнцестояния** — две точки на эклиптике, где Солнце в течение года достигает максимального и минимального склонения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. <http://www.edu.ru/file/docs/2017/06/m506.pdf> — Стандарт среднего (полного) общего образования по астрономии.
2. [www.astronet.ru](http://www.astronet.ru) — Российская Астрономическая Сеть.
3. Воронцов–Вельяминов Б.А. Астрономия. Базовый уровень. 11 класс: учебник / Б.А. Воронцов-Вельяминов, Е.К. Страут. — 5-е изд., пересмотр. — М.: Дрофа, 2018.
4. Засов А.В. Астрономия: 10–11 классы / А.В. Засов, В.Г. Сурдин. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019.
5. Масликов С.Ю., Орлов И.О., Самусь Н.Н. Методическое пособие к учебнику В.М. Чаругина «Астрономия. 10–11 классы: учебник для общеобразовательных организаций, базовый уровень». — Новосибирск: ИД «Вояж», 2017.
6. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии / под ред. В.Г. Сурдина. Изд. 5-е, перераб., полн., обновл. — М.: Эдиториал УРСС, 2002.

# ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

**А.М. Черепашук,**

*академик РАН,*

*научный руководитель Государственного астрономического  
института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова,*

*председатель Научного совета по астрономии РАН,*

*член Правления Международной общественной организации  
"Астрономическое Общество"*

Под черной дырой (ЧД) понимается область пространства-времени, гравитационное поле которой столь сильно, что никакой сигнал, даже световой, не может удалиться от нее на пространственную бесконечность будущего. Согласно общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна, чтобы образовать ЧД необходимо сжать тело до замеров гравитационного (Шварцшильдовского) радиуса

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

где  $M$  — масса тела,  $c$  — скорость света в пустоте,  $G$  — ньютоновская гравитационная постоянная. Величина шварцшильдовского радиуса равна 9 мм для Земли, 30 км для массы, равной  $10M_{\odot}$  и 40 астрономических единиц (расстояние от Солнца до Плутона) для массы  $M = 2 \cdot 10^9 M_{\odot}$  (такие сверхмассивные ЧД наблюдаются в ядрах некоторых галактик). Физической границей ЧД является горизонт событий, на

котором с точки зрения далекого наблюдателя ход времени останавливается. Все события, которые происходят под горизонтом событий, недоступны внешнему наблюдателю. Для невращающейся, шварцшильдовской ЧД, радиус горизонта событий  $r_h = r_g$ , для вращающейся ЧД  $r_h < r_g$ , для предельно быстро вращающейся (Керровской) ЧД  $r_h = \frac{1}{2} r_g$  (иногда под гравитационным радиусом понимается именно эта величина). В центре ЧД расположена сингулярность, куда сколлапсировало вещество, из которого она образовалась. В сингулярности, где плотность материи формально бесконечна, известные нам законы физики уже неприменимы, скорее всего, там царят неизвестные нам пока законы квантовой гравитации. Но тогда как же мы можем строить теорию ЧД, не зная этих законов?

Спасает то обстоятельство, что пространство и время внутри ЧД сильно переплетаются, и сингулярность находится в будущем по отношению к горизонту событий. Поэтому можно строить теорию горизонта событий и подавляющей части внутренней ЧД с помощью классической, не квантовой ОТО Эйнштейна. Горизонт событий у вращающейся ЧД погружен внутрь эргосферы, где существует вихревое гравитационное поле. Тела, попавшие внутрь эргосферы, будут непрерывно двигаться, подхваченные вращающимся пространством-временем ЧД. Свойства ЧД столь необычны, что в их существование верится с трудом. Действительно, остановка хода времени на горизонте событий ЧД для внешнего наблюдателя означает, что, если мы пошлем к ЧД космический корабль с космонавтами на борту, то далекому наблюдателю будет казаться, что корабль по мере приближения к ЧД будет замедлять свое движение и никогда не достигнет горизонта событий. В то же время, с точки зрения космонавтов, сидящих в корабле, космический корабль проникает внутрь ЧД и за конечное время падает в центральную сингулярность, будучи разорванным на части огромными приливными силами. Космонавты с их точки зрения, падая внутрь ЧД погибают, а

с точки зрения внешнего наблюдателя они живут бесконечно долго (!). Таким образом, существование ЧД означает, что даже понятие жизни и смерти космонавта относительно: в системе координат далекого наблюдателя космонавт живет бесконечно долго, а в собственной системе отсчета он неизбежно погибает.

Еще одна удивительная особенность ЧД связана с оценкой ее объема. Казалось бы, поскольку мы знаем радиус горизонта событий  $r_h$ , то объем ЧД можно вычислить по классической формуле для объема шара радиусом  $r_h$ . При этом получается конечное значение объема. Но это неправильно! Описанный метод оценки объема ЧД основан на предположении, что пространство ЧД эвклидово. Это, разумеется, не так. Пространство вблизи и внутри ЧД сильнее всего искривлено. Если учесть это искривление пространства, то приходится признать, что объем ЧД любой массы равен бесконечности (!). Поэтому внутри ЧД бесконечно много места, и там могут существовать даже другие Вселенные.

Также отметим такое необычное свойство ЧД, как телеологическая природа ее горизонта событий. Телеология это философское учение, которое предполагает, в частности, что судьба человека заранее предопределена. Оказывается, что ЧД обладает таким необычным свойством: движение горизонта событий ЧД зависит не от того, что произошло с ним в прошлом, а от того, что произойдет с ним в будущем (!).

Горизонт событий — это не твердая наблюдаемая поверхность, это, как говорят, световая поверхность в пространстве-времени. Особенности на горизонте событий могут быть устранены выбором подходящей системы отсчета. Например, в системе отсчета, связанной со свободно падающим на ЧД наблюдателем, особенности на горизонте событий исчезают. Вблизи горизонта событий могут рождаться элементарные частицы, в том числе, фотоны. Поэтому ЧД, излучая энергию, уменьшает свою массу (так называемое Хоукинское квантовое испарение ЧД). Правда для ЧД звездных масс

и сверхмассивных ЧД время квантового испарения много больше возраста Вселенной.

В силу сказанного, не удивительно, что буквально до начала 21 века многие ученые не верили в возможность существования ЧД. Даже сам великий Эйнштейн, создатель ОТО, из которой следует возможность существования ЧД, весьма скептически относился к возможности реального существования ЧД. В середине 1970-х годов были созданы релятивистские теории гравитации, в которых отвергалась возможность существования ЧД в природе. Все это делает проблему поиска и исследования ЧД особенно интригующей и интересной.

Полвека исследований привели к тому, что к настоящему времени получены убедительные доказательства существования ЧД как звездных масс, так и сверхмассивных. Это связано с достижениями в области рентгеновской, оптической астрономии, гравитационно-волновой астрономии, а также благодаря развитию методов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, позволяющих достигать очень высокого углового разрешения. Согласно современным представлениям, если масса ядра звезды, претерпевшего термоядерные превращения, превышает  $3M_{\odot}$ , то в конце эволюции такой массивной звезды образуется ЧД. Если же масса ядра звезды менее  $3M_{\odot}$ , в конце звездной эволюции образуется либо белый карлик, либо нейтронная звезда. Поэтому измерение массы принципиально важно для отождествления компактного объекта с ЧД. Кроме того, необходимо измерить радиус компактного объекта и показать, что он не превышает шварцшильдовского, гравитационного радиуса. Именно в этих направлениях и развивалась область астрономии, нацеленная на поиск ЧД во Вселенной.

ЧД звездных масс открываются в тесных двойных системах по рентгеновскому излучению, возникающему при аккреции вещества соседней звезды на ЧД. Предсказание мощного выделения энергии при несферической аккреции вещества



на ЧД было сделано в 1964 году в работах Я.Б. Зельдовича и Е.Е. Салпитора. Массы таких ЧД определяются по орбитальному движению звезд-доноров вещества с применением законов Кеплера, следующих из закона тяготения Ньютона. Применение закона Ньютона для определения масс ЧД вполне оправдано, поскольку размеры орбит тесных двойных (рентгеновских) систем много больше гравитационных радиусов ЧД. О малых радиусах таких компактных объектов свидетельствует наличие мощного рентгеновского излучения и его быстрая переменность.

В 2015 году были открыты гравитационные волны от слияния ЧД в двойных системах, что поставило проблему поиска и исследования звездных ЧД на качественно новый уровень. Если в рентгеновских двойных системах мы можем лишь пассивно наблюдать процессы аккреции газа на ЧД, то в гравитационно-волновых двойных системах (так можно называть тесные двойные системы, состоящие из двух ЧД или НЗ, которые сливаются и испускают всплеск гравитационных волн) нам представляется возможность как бы экспериментировать с ЧД, путем наблюдения процессов их слияния и формирования общего горизонта событий. Для определения масс ЧД в гравитационно-волновых двойных системах используются формулы ОТО. Оказалось, что сложные кривые изменения потока гравитационных волн от сливающихся ЧД в двойных системах прекрасно согласуются с теоретическими кривыми, рассчитанными в рамках ОТО. Это, с одной стороны, позволило проверить ОТО в сильных гравитационных полях, причем не только в статике, но и в динамике, с другой привело к тому, что к настоящему времени отпали всякие сомнения в реальном существовании ЧД во Вселенной.

К настоящему времени по наблюдениям, выполненным гравитационно-волновыми обсерваториями LIGO (США) и Virgo (Италия), определены массы около сотни ЧД звездных масс в гравитационно-волновых двойных системах, даны

оценки их моментов вращения, изучены тонкие эффекты ОТО при слиянии ЧД. Если за полвека исследований рентгеновских двойных систем были измерены массы лишь около трех десятков звездных ЧД ( $M=4\div 16M_{\odot}$ ), то всего за 5 лет исследований ученым удалось измерить массы около сотни ЧД ( $M=8\div 140M_{\odot}$ ). Таким образом, можно утверждать, что «пальма первенства» в исследованиях ЧД звездных масс в настоящее время перешла от рентгеновских двойных систем к гравитационно-волновым двойным системам.

Дальнейшее повышение чувствительности гравитационно-волновых телескопов и создание космических гравитационно-волновых телескопов (проект LISA, Европейское космическое агентство) позволит осуществить настоящий прорыв в исследованиях как двойных ЧД звездных масс, так и двойных сверхмассивных ЧД.

Сверхмассивные ЧД ( $M=10^6\div 10^{10}M_{\odot}$ ) наблюдаются в ядрах большинства галактик. Следует отметить, что еще в 1950-х годах академик В.А. Амбарцумян обратил внимание на то, что в ядрах некоторых галактик происходят сложные нестационарные процессы. Сейчас общепринято считать, что практически в ядре каждой галактики находится сверхмассивная ЧД. Кроме того, в ядрах многих галактик наблюдаются массивные звездные скопления, которые в ряде случаев сосуществуют со сверхмассивной ЧД.

Массовое открытие сверхмассивных ЧД началось в начале 1990-х годов. Сверхмассивные ЧД обнаруживались путем исследований центральных областей галактик (их ядер). Массы сверхмассивных ЧД оценивались по движению «пробных тел» (звезд, газовых облаков, газовых дисков и т.п.), с применением закона тяготения Ньютона. Ограничения на радиусы сверхмассивных ЧД получались из наблюдений быстрой переменности излучения ядер галактик, а также, в отдельных случаях, с применением методов высокого углового разрешения, в том числе, методов межконтинентальной радиоинтерферометрии на коротких волнах.

К настоящему времени измерены массы тысяч сверхмассивных ЧД в ядрах галактик, которые лежат в пределах  $10^6 \div 10^{10} M_{\odot}$ . На базе наблюдательных данных по звездным и сверхмассивным ЧД родилась новая область астрофизики — демография ЧД, которая изучает рождение, рост ЧД и их эволюционную связь с классическими объектами Вселенной — звездами, галактиками, скоплениями галактик и т.п.

Опишем кратко некоторые результаты, полученные в области изучения демографии ЧД.

1. Не наблюдается корреляция между массами звездных ЧД и массами оптических звезд в рентгеновских двойных системах. ЧД встречаются как в массивных рентгеновских двойных системах (с массами оптических звезд-доноров вещества  $\sim 10 \div 70 M_{\odot}$ ), так и в маломассивных (с массами оптических звезд  $\sim 0.5 \div 1 M_{\odot}$ ).

2. Распределение масс в массивных и маломассивных рентгеновских двойных системах различаются (см. рис. 1). В маломассивных рентгеновских двойных системах массы ЧД концентрируются к значению  $\sim 8 M_{\odot}$ , в то время как в массивных системах массы ЧД имеют примерно равномерное распределение в диапазоне от  $4 M_{\odot}$  до  $16 \div 17 M_{\odot}$ . Эти различия отражают различия в эволюционных путях массивных и маломассивных рентгеновских двойных систем.

3. Массы ЧД в рентгеновских двойных системах имеют примерно плоское распределение (см. рис. 1). То, что число открытых ЧД в рентгеновских двойных системах не возрастает с уменьшением массы ЧД кажется удивительным. Ведь число звезд в Галактике — производителей ЧД, с учетом времени их жизни сильно (как  $M^{-5}$ ) возрастает с уменьшением массы звезды.

Кроме того, в распределении масс релятивистских объектов намечается провал в диапазоне  $2-5 M_{\odot}$ . В этом диапазоне масс число открытых НЗ и ЧД резко уменьшается. Скорее всего, масса образовавшейся звездной ЧД определяется не

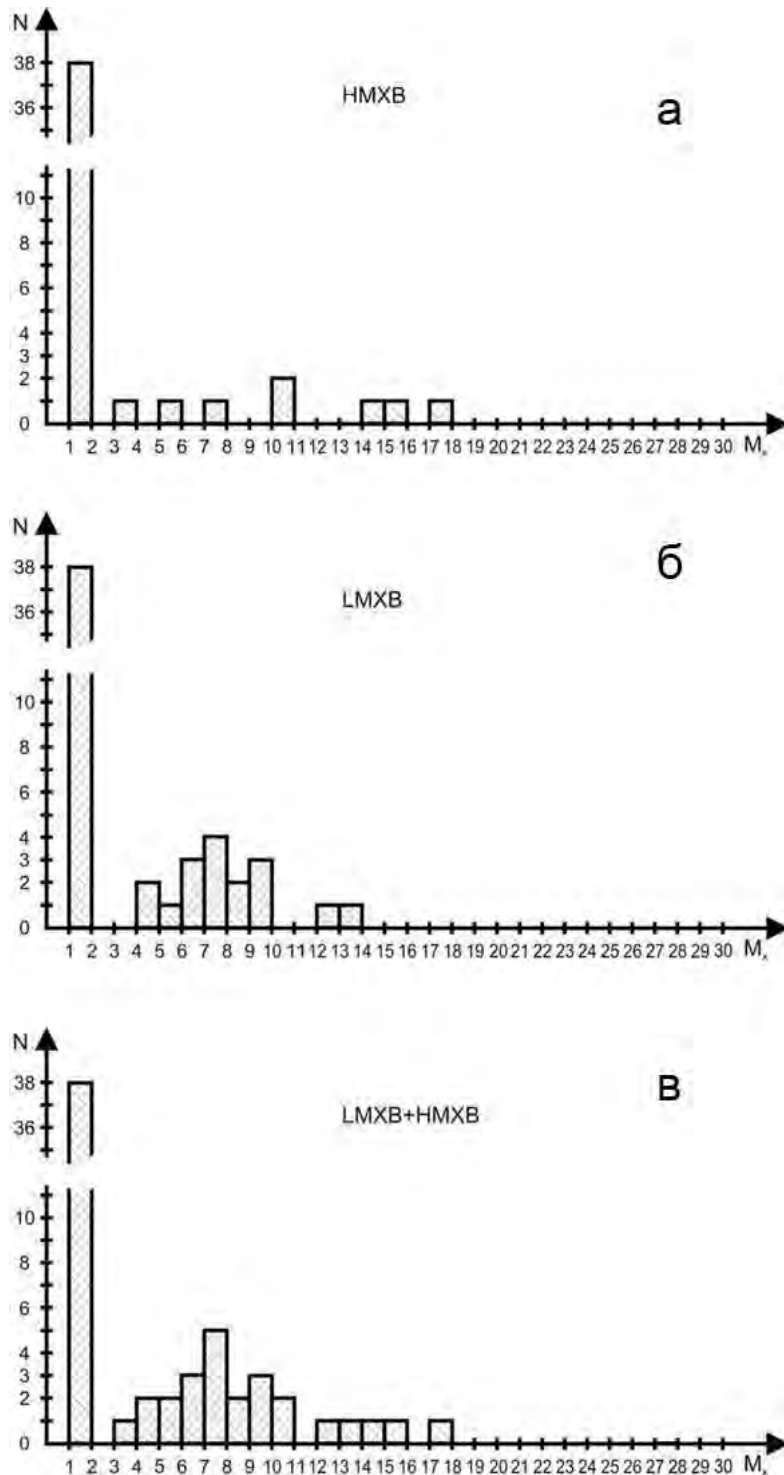


Рис. 1. Распределение масс нейтронных звезд и черных дыр: (а) в массивных рентгеновских двойных системах (High-Mass X-ray Binary — HMXB) со спутниками — массивными оптическими O-B и WR звездами; (б) в маломассивных рентгеновских двойных системах (Low-Mass X-ray Binary — LMXB); (в) суммарное распределение масс черных дыр и нейтронных звезд (в массивных и маломассивных рентгеновских двойных системах). Высокий пик в левой части рисунка соответствует нейтронным звездам

только массой родительской звезды, но и другими параметрами (потерей массы массивной звезды в виде звездного ветра, вращением ядра звезды, его магнитным полем, различными неустойчивостями, возникающими при коллапсе ядра и т.п.).

4. Наблюдения рентгеновских двойных систем выявили очень красивый результат: оказывается, что НЗ и ЧД различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном согласии с предсказаниями ОТО Эйнштейна. Этот результат можно рассматривать как косвенное свидетельство отсутствия наблюдаемых поверхностей у звездных ЧД и наличия у них горизонтов событий.

5. Обнаружение гравитационных волн от слияния ЧД в двойных системах, сделанное лазерной гравитационно-волновой обсерваторией LIGO в 2015 году, открыло новую эру в исследованиях ЧД звездных масс. Как уже отмечалось, к настоящему времени (2022 г.) методами гравитационно-волновой астрономии измерены массы около сотни ЧД ( $M=8\div 140M_{\odot}$ ). Суммарно обсерваториями LIGO и Virgo открыто свыше трех десятков двойных сливающихся ЧД. Поскольку в каждой паре ЧД по форме гравитационно-волнового сигнала измеряются массы отдельных ЧД до слияния и масса результирующей ЧД после слияния, полное число измеренных масс ЧД приближается к сотне.

В таблице 1 приведены параметры первых четырех двойных сливающихся ЧД, открытых обсерваториями LIGO и Virgo.

Таблица 1

**Параметры гравитационно-волновых двойных систем с черными дырами, открытых обсерваториями LIGO и VIRGO**

| Параметр                    | GW150914       | GW151226         | GW170104         | GW170814         |
|-----------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Масса первичной черной дыры | 36 $M_{\odot}$ | 14.2 $M_{\odot}$ | 31.2 $M_{\odot}$ | 30.5 $M_{\odot}$ |

|   |                           |                           |                           |                           |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Масса вторичной черной дыры                   | 29 $M_{\odot}$            | 7.5 $M_{\odot}$           | 19.4 $M_{\odot}$          | 25.3 $M_{\odot}$          |
| Чирп – масса                                  | ~30 $M_{\odot}$           | 8.9 $M_{\odot}$           | 21.1 $M_{\odot}$          | 24.1 $M_{\odot}$          |
| Суммарная масса двух черных дыр               | ~65 $M_{\odot}$           | 21.8 $M_{\odot}$          | 50.7 $M_{\odot}$          | 55.9 $M_{\odot}$          |
| Окончательная масса черной дыры после слияния | 62 $M_{\odot}$            | 20.8 $M_{\odot}$          | 48.7 $M_{\odot}$          | 53.2 $M_{\odot}$          |
| Излученная энергия в виде ГВ                  | 3.0 $M_{\odot}c^2$        | 1.0 $M_{\odot}c^2$        | 2.0 $M_{\odot}c^2$        | 2.7 $M_{\odot}c^2$        |
| Пиковая ГВ-светимость                         | $3.6 \cdot 10^{56}$ эрг/с | $3.3 \cdot 10^{56}$ эрг/с | $3.1 \cdot 10^{56}$ эрг/с | $3.7 \cdot 10^{56}$ эрг/с |
| Финальный момент вращения ЧД после слияния    | 0.67                      | 0.74                      | 0.64                      | 0.70                      |
| Расстояние, оцененное по ГВ-светимости        | 410 Мпк                   | 440 Мпк                   | 880 Мпк                   | 570 Мпк                   |
| Красное смещение источника ГВ                 | 0.09                      | 0.09                      | 0.18                      | 0.11                      |

*Примечание:*

Параметры систем взяты из оригинальных статей: Abbott B.P. et al., Phys. Rev. Lett. **v.116**, p.061102, 2016, **v.116**, p.241103, 2016, **v.118**, p.221101, 2017; **v.119**, p. 141101, 2017.

Следует отметить, что массы результирующих ЧД после слияния меньше суммы масс двух исходных ЧД из-за того, что часть массы-энергии ( $\sim 1 \div 3 M_{\odot}$ ) излучилась при слиянии в виде гравитационных волн. Поскольку гравитационно-вол-

новой сигнал длится лишь доли секунды, соответствующая пиковая мощность, излученная в виде гравитационных волн, составляет чудовищно большую величину порядка  $(3\div 4)\cdot 10^{56}$  эрг/с. Эта гравитационно-волновая светимость от одного слияния двух ЧД в сотни раз превосходит электромагнитную светимость всех звезд наблюдаемой Вселенной (!). Во всех случаях гравитационно-волновые сигналы пришли к нам с расстояний порядка многих сотен мегапарсек, поэтому при вычислении параметров двойных систем ЧД необходимо учитывать космологические эффекты.

6. В таблице 2 приведены для сравнения параметры гравитационно-волновых двойных систем с ЧД, параметры массивных рентгеновских двойных систем с ЧД и параметры классических массивных тесных двойных систем, состоящих из «обычных» звезд.

Таблица 2

**Различные двойные системы**

| Система   | Типы компонент | Массы ( $M_{\odot}$ ) | Начальные массы звезд ( $M_{\odot}$ ) | Орбитальный период (сутки) | Темп потери массы ( $M_{\odot}/\text{год}$ ) |
|---|----------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------|--|
| Гравитационно-волновые двойные системы с черными дырами.  |                |                       |                                       |                            |  |
| GW150914  | ВН+ВН          | 36+29                 | 100+80                                | —                          | —  |
| GW151226  | ВН+ВН          | 14.2+7.5              | 50+30                                 | —                          | —  |
| LVT151012   | ВН+ВН          | 23+13                 | 75+50                                 | —                          | —  |
| GW170104  | ВН+ВН          | 31.2+19.4             | 80+60                                 | —                          | —  |
| GW170814  | ВН+ВН          | 30.5+25.3             | 79+75                                 | —                          | —  |
| Массивные рентгеновские двойные системы с черными дырами. |                |                       |                                       |                            |  |
| Cyg X-1   | O9.7Iab+ВН     | 19.16+14.81           | —                                     | 5.60                       | —  |
| LMC X-1   | O(7-9)III+ВН   | 30.6+10.3             | —                                     | 3.91                       | —  |
| M33 X-7   | O(7-8)III+ВН   | 70.0+15.6             | —                                     | 3.45                       | —  |

| Классические массивные тесные двойные системы. |             |          |   |       |                        |
|--|-------------|----------|---|-------|------------------------|
| WR20a  | WN6h+WN6a   | 83+82    | — | 3.69  | $\sim 10^{-5}$         |
| NGC3603-A1                                     | WN6a+WN6    | 116+89   | — | 3.77  | $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ |
| R136-38 (LMC)                                  | O3V+O3V     | 56+30    | — | 3.39  | $\sim 10^{-6}$         |
| R145 (LMC)                                     | WN6h+O      | >116+>48 | — | 158.8 | $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ |
| WR21a  | O3f/WN6a+O4 | >87+>53  | — | 31.67 | $\sim 10^{-5}$         |

*Примечание:*

ВН (black hole) — ЧД.

Классические массивные двойные системы эволюционируют с обменом массами в рентгеновские двойные системы, в которых одна звезда породила ЧД, а вторая звезда является донором вещества, обеспечивая процесс аккреции на сформировавшуюся ЧД. По прошествии нескольких миллионов лет звезда-донор формирует вторую ЧД и образуется тесная двойная система из двух ЧД. По прошествии нескольких миллиардов лет двигающиеся по своим орбитам две ЧД теряют энергию орбитального движения в виде излучения гравитационных волн и сливаются, формируя наблюдаемый всплеск гравитационно-волнового излучения.

7. Как следует из таблицы 2, массы ЧД в гравитационно-волновых двойных системах в среднем значительно больше масс ЧД в рентгеновских двойных системах. Это связано с тем, что объем пространства, в котором располагаются гравитационно-волновые двойные системы, много больше, чем объем пространства, занимаемый рентгеновскими двойными системами. Гравитационно-волновая астрономия чаще всего регистрирует процессы слияния ЧД, расположенных от нас на громадных расстояниях порядка гигапарсек. Эти расстояния соответствуют большим красным смещениям и относительно малым собственным возрастам звезд — производителей ЧД. Поэтому эти звезды, как объекты III типа населения, должны иметь большую массу ( $\sim 100-1000M_{\odot}$ ) и малую металличность, что обуславливает слабый звездный ветер. Это



и приводит к тому, что гравитационно-волновая астрономия регистрирует сравнительно массивные звездные ЧД.

8. Открыто много квазаров (очень активных ядер галактик) с собственным возрастом менее 1 млрд лет и огромными массами центральных сверхмассивных ЧД  $10^8 \div 10^{10} M_{\odot}$ . Как такие массивные ЧД успели сформироваться за столь короткое время — вопрос, который волнует многих ученых. Дискутируется даже вопрос о том — что первично в образовании галактики: сверхмассивная ЧД с последующим формированием звезд галактики вокруг нее или сама галактика, в центре которой «вызревает» сверхмассивная ЧД. Из наблюдений большого числа (десятки тысяч) квазаров на разных красных смещениях выявляется удивительный результат: массы центральных сверхмассивных ЧД в среднем тем больше, чем меньше собственный возраст квазара.

9. Выявлена важная корреляция между массами сверхмассивных ЧД, массами центральных звездных скоплений и параметрами сфероидальной компоненты галактик:

$$M \sim \sigma^{\beta},$$

где  $M$  — масса ЧД или звездного скопления,  $\sigma$  — дисперсия (разброс) скоростей звезд сфероидальной компоненты. Для центральных звездных скоплений показатель степени  $\beta = 1.6 \div 2.7$ , а для сверхмассивных ЧД  $\beta = 4 \div 5$ . Это позволяет предположить, что механизмы образования звездных скоплений и сверхмассивных ЧД различны.

10. Оказалось, что параметры сверхмассивных ЧД по-разному коррелируют с различными галактическими компонентами. Массы сверхмассивных ЧД тесно коррелируют только с параметрами классических балджей и эллиптических галактик. В то же время, эти массы весьма слабо коррелируют с параметрами псевдобалджей и галактических гало, состоящих в основном из темной материи. Балдж — это центральная сферическая часть галактики, состоящая из старых мало-массивных звезд с большой дисперсией скоростей, а псевдо-

балдж — это утолщение в центральных частях галактического диска, состоящее из молодых звезд с повышенной дисперсией скоростей (каким-то образом «разогретая» часть молодого звездного населения галактики). Массы сверхмассивных ЧД совсем не коррелируют с параметрами дисков галактик, где содержатся молодые звезды.

11. Выявлена надежная статистическая зависимость массы центральной сверхмассивной ЧД от массы галактического балджа. В частности, для «стандартной» массы балджа  $10^{11} M_{\odot}$  масса центральной сверхмассивной ЧД составляет около 0.5% от массы балджа. Хотя следует отметить, что имеются редкие исключения от такой зависимости, которые можно объяснить тем, что крупные галактики часто формируются в результате слияния более мелких галактик. В результате таких слияний в ядрах галактик могут образовываться двойные и кратные сверхмассивные ЧД, которые в ряде случаев реально наблюдаются.

12. Обсуждаются различные аспекты коэволюции (совместной взаимной эволюции) сверхмассивных ЧД и хозяйских галактик.

Слабая форма коэволюции предполагает влияние хозяйской галактики на центральную сверхмассивную ЧД посредством аккреции галактического газа и звезд на ЧД, слияния галактик и т.п. Уже открыто много случаев приливного разрушения звезд вблизи сверхмассивной ЧД. При этом формируется транзитный (временно существующий) аккреционный диск вокруг ЧД и наблюдается вспышка рентгеновского, ультрафиолетового и оптического излучения длительностью многие месяцы. Частота таких событий оценивается как одно приливное разрушение звезды за  $10^4$  лет для галактики типа нашей. Недавно с борта орбитальной рентгеновской обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (российско-германский эксперимент) были зафиксированы десятки событий приливного разрушения звезд в центрах различных галактик. В процессе такой нестационарной аккреции масса

центральной сверхмассивной ЧД увеличивается. Таким образом, слабая форма коэволюции ограничивается воздействием хозяйской галактики на центральную сверхмассивную ЧД.

Сильная форма коэволюции имеет место, когда сама сверхмассивная ЧД влияет на структуру и эволюцию хозяйской галактики. Это происходит, например, в активных ядрах галактик, когда при огромном темпе аккреции вещества галактики на центральную ЧД, давление излучения формирует мощный отток вещества от сверхкритического аккреционного диска вокруг ЧД (мощный ветер, релятивистские джеты и т.п.). Это приводит к выметанию газа из хозяйской галактики и уменьшению темпа звездообразования в ней. Такие процессы влияют на цвет галактики и структуру ее центральных частей.

Мы рассмотрели результаты массовых исследований сверхмассивных ЧД и их статистических характеристик, что составляет предмет демографии ЧД. Рассмотрим теперь особые случаи, когда свойства отдельных сверхмассивных ЧД удалось изучить наиболее детально.

Сверхмассивная ЧД в центре нашей Галактики расположена очень близко к Земле, примерно на расстоянии 25 тысяч световых лет. Поэтому ученым удалось изучить движения индивидуальных звезд вблизи сверхмассивной ЧД и даже построить полную эллиптическую орбиту звезды S2, у которой период обращения оказался равным 15.6 лет (см. рис. 2). За эту работу ученым Генцелю и Гез в 2020 году была присуждена Нобелевская премия. Зная угловой размер большой полуоси орбиты звезды S2 при известном расстоянии до Галактического центра, можно определить абсолютные линейные размеры большой полуоси. При известном орбитальном периоде в данном случае по третьему закону Кеплера находится сумма масс сверхмассивной ЧД и звезды. Поскольку масса звезды S2 порядка  $10 M_{\odot}$ , таким образом с большой точностью и надежностью находится масса сверхмассивной ЧД в центре Галактики. По данным на 2009 г. это значение составило

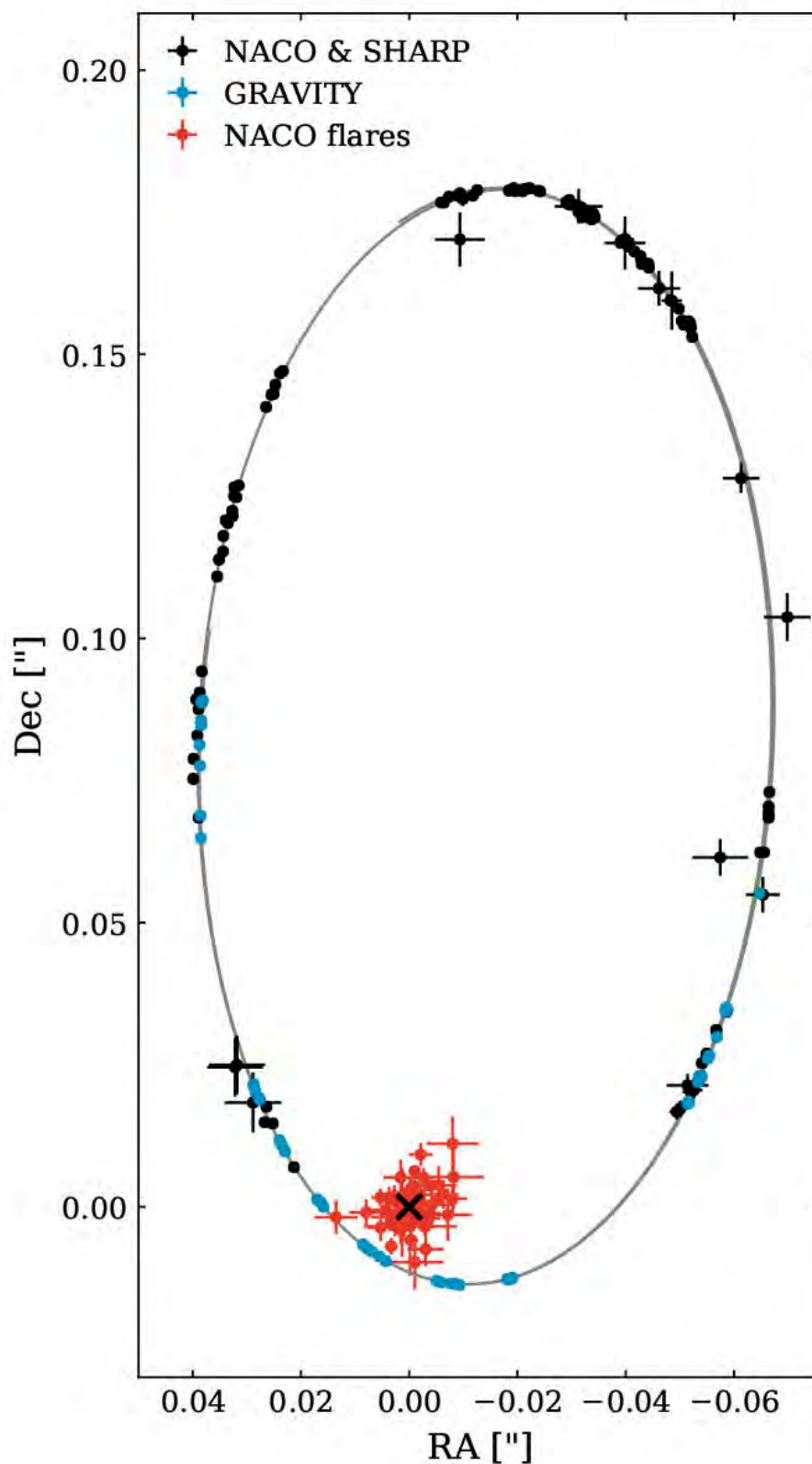


Рис. 2. Орбита звезды S2 вокруг сверхмассивной ЧД в центре Галактики  
 (из работы GRAVITY collaboration, Abuter R. et al.,  
*Astronomy and astrophysics* v. 636, p. L5, 2020).  
[www.aanda.org/articles/aa/pdf/2020/04/aa37813-20.pdf](http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2020/04/aa37813-20.pdf)

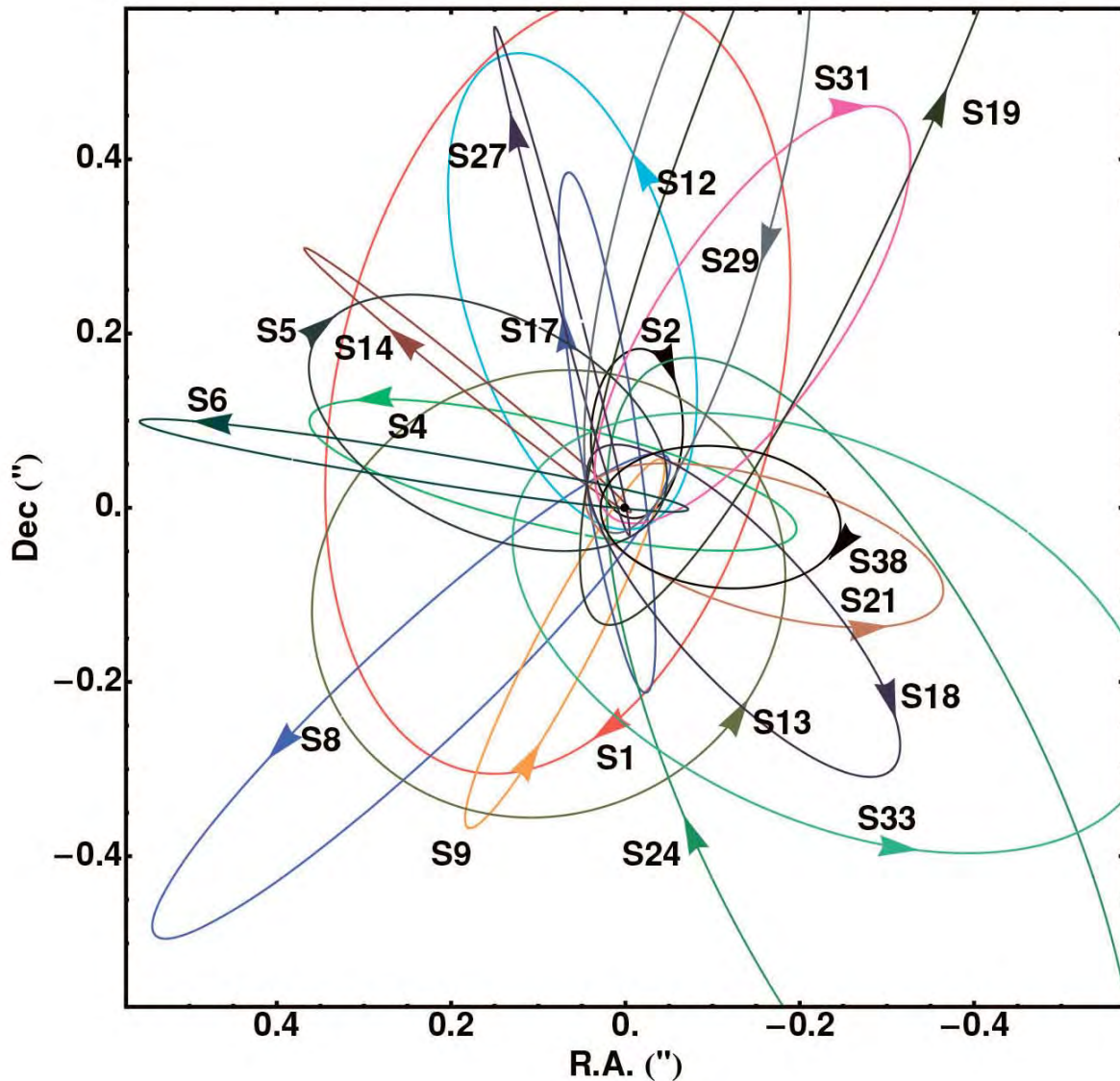


Рис. 3. Орбиты 26 звезд вокруг сверхмассивной ЧД в центре Галактики, использованные для определения ее массы (из работы Gillesen et al., *Astrophysical J.* v. 692, p. 1075, 2009).  
[www.iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/692/2/1075/pdf](http://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/692/2/1075/pdf)

$(4.31 \pm 0.36) \cdot 10^6 M_{\odot}$ . Таким образом, значение массы сверхмассивной ЧД в центре Галактики получено с точностью лучше 10%. Это значение подтверждается наблюдениями отрезков орбит других звезд центрального Галактического звездного скопления (всего около трех десятков звезд — см. рис. 3). К настоящему времени удалось пронаблюдать у звезды S2 почти два орбитальных периода (см. рис. 2). Измерено релятиви-

стское смещение периастра (прецессия) орбиты звезды S2, которое в точности согласуется с теоретическим значением этого смещения, предсказанным в рамках ОТО Эйнштейна. Высказывались гипотезы о том, что из-за сильной концентрации темной материи вблизи сверхмассивной ЧД у звезды S2 должны наблюдаться аномальные эффекты в смещении периастра орбиты (т.н. ньютоновская прецессия). Наблюдения показали, что это не так, прецессия орбиты звезды S2 при известной массе сверхмассивной ЧД  $4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$  строго согласуется с ОТО Эйнштейна.

Недавно в центре Галактики была открыта еще одна, более слабая звезда S62, которая расположена ближе к сверхмассивной ЧД и у которой орбитальный период равен 9.9 лет, а у звезды S4711 период еще короче — 7.6 лет. Недавно также была открыта звезда под номером S4714, которая обращается вокруг сверхмассивной ЧД с релятивистской скоростью 24 000 км/с. Дальнейшие наблюдения движений очень близко расположенных к сверхмассивной ЧД звезд позволят лучше протестировать ОТО и, возможно, оценить вклад темной материи вблизи центральной ЧД. Поскольку к настоящему времени измерены орбитальные движения многих десятков звезд вблизи сверхмассивной ЧД в центре Галактики, ученые, изучив ориентацию орбит этих звезд в пространстве, дали оценку безразмерного углового момента вращения этой ЧД  $a = 0.1$ . Это означает, что сверхмассивная ЧД в центре Галактики вращается сравнительно медленно (предельно быстрое вращение ЧД соответствует  $a = 1$ ).

Что касается наблюдательного определения радиуса сверхмассивной ЧД в центре Галактики, то здесь также имеются большие достижения. Например, недавно ученым из консорциума европейских институтов, входящих в Южно-Европейскую обсерваторию, удалось отнаблюдать вращение газовых облаков вокруг сверхмассивной ЧД в центре Галактики с угловым разрешением порядка миллисекунды на расстоянии около 3.5 Шварцшильдовских радиусов с

релятивистскими скоростями около 100000 км/с. Таким образом, ученым удалось прямыми наблюдениями убедиться в наличии релятивистских движений газа вблизи последней устойчивой орбиты вокруг «нашей» сверхмассивной ЧД (для Шварцшильдовской ЧД радиус последней устойчивой орбиты равен  $3 r_g$ ). Большие надежды в связи с изучением ближайших окрестностей сверхмассивной ЧД в центре Галактики возлагаются на научный консорциум Event Horizon Telescope (ЕНТ) — телескоп для исследований горизонтов событий ЧД, который обеспечивает угловое разрешение  $\sim 10^{-5}$  секунды дуги.

Особенно впечатляющие результаты были получены этим консорциумом при исследовании ближайших окрестностей сверхмассивной ЧД в центре галактики М87. Масса этой ЧД составляет  $6.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$ , что примерно в тысячу раз больше массы сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики. Поэтому, хотя галактика М87 удалена от нас на расстояние в 1000 раз больше, чем центр Галактики, угловые размеры сверхмассивных ЧД в центрах нашей Галактики и галактики М87 почти совпадают. Галактика М87 удобна для исследований на ЕНТ тем, что она видна для наблюдателя почти «плашмя» (угол между плоскостью галактики и картинной плоскостью составляет  $\sim 17^\circ$ ), в то время, как на сверхмассивную ЧД в центре нашей Галактики наблюдатель смотрит, находясь в галактической плоскости. Кроме того, ввиду большой массы ЧД в центре галактики М87, характерные времена переменности ее излучения сравнительно велики, что позволяет применять большие времена накопления сигнала при радиоинтерферометрических наблюдениях со сверхдлинной базой, которые реализуются на ЕНТ. В 2019 году международный научный консорциум ЕНТ, используя межконтинентальный радиоинтерферометр из 8 радиотелескопов, работающих на миллиметровых волнах, с максимальной базой 10 000 км, получил с разрешением  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  секунды дуги изображение ближайших окрестностей и темной тени сверхмассивной

ЧД в центре галактики М87 (см. рис. 4). Согласно ОТО, диаметр тени для шварцшильдовской ЧД в 2.6 раза больше ее удвоенного шварцшильдовского радиуса  $r_g$  и в случае галактики М87 составляет  $3.8 \cdot 10^{-5}$  секунды дуги. Это вполне измеримая величина для ЕНТ. На рис. 5 приведено схематическое изображение шварцшильдовской ЧД в воображаемом эвклидовом пространстве. Отмечены сингулярность в центре, горизонт событий, а также фотонная сфера, радиус которой составляет  $1.5 r_g$  и внутри которой лучи света могут двигаться по замкнутым траекториям. Отметим, что движение фотонов, скорость которых  $300\,000$  км/с, по замкнутым круговым орбитам возможно только в сильнейшем гравитационном поле ЧД. Гравитационное поле нейтронной звезды не достаточно сильно, чтобы заставить фотоны двигаться по круговым траекториям. Изображение ЧД, приведенное на рис. 5, соответствует случаю воображаемого эвклидового



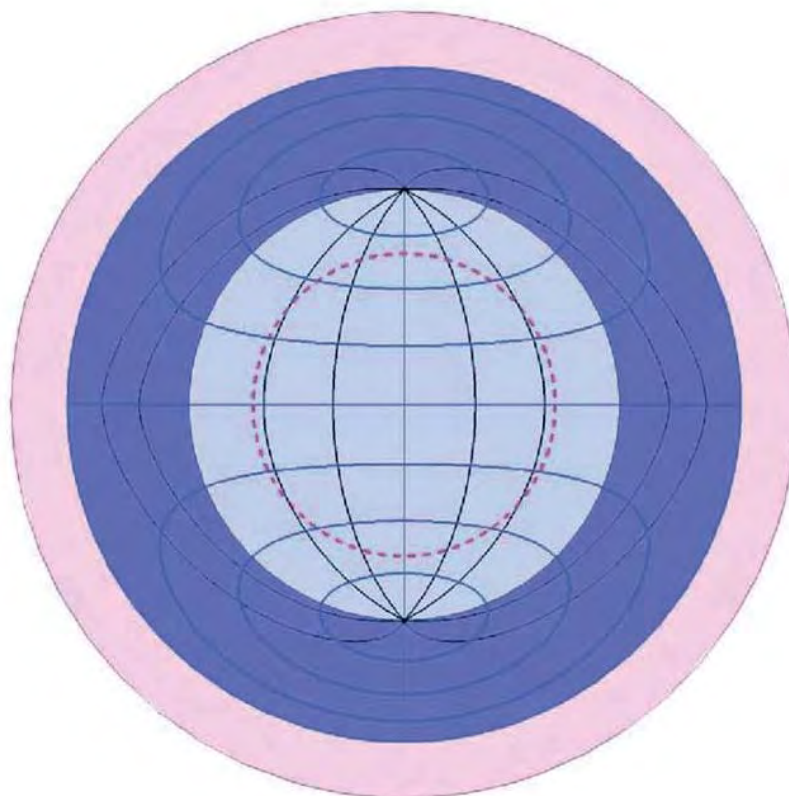
*Рис. 4. Изображение ближайших окрестностей и тени ЧД в ядре Галактики М87, полученное на ЕНТ. Асимметрия распределения яркости вызвана тем, что плоскость аккреционного диска вокруг центральной ЧД наклонена к картинной плоскости на угол  $17^\circ$*





*Рис. 5. Схематическое изображение шварцшильдовской ЧД, в воображаемом евклидовом пространстве*

пространства, когда лучи света, идущие от ЧД к наблюдателю, двигаются по прямолинейным траекториям. В реальности лучи света, идущие от ближайших окрестностей горизонта событий и от фотонной сферы, двигаются в экстремально сильном гравитационном поле ЧД, и потому они идут к наблюдателю по сильно искривленным траекториям. ЧД для внешнего наблюдателя действует как увеличивающая линза для самой себя, поэтому наблюдаемые размеры горизонта событий (ближайшие окрестности которого при аккреции вещества могут быть наблюдаемыми) и размеры фотонной сферы кажутся значительно увеличенными (для фотонной сферы, как уже упоминалось, это увеличение составляет 2.6 раза). Более того, гравитационное поле ЧД столь сильно, что лучи света от задней полусферы горизонта событий, испытывая сильнейшее искривление, достигают наблюдателя, поэтому внешнему наблюдателю становится видна не только передняя часть горизонта событий, но и его задняя часть, которая проектируется на картинную плоскость в виде кольца, окаймляющего изображение передней полусферы горизонта событий. Рис. 6 поясняет сказанное. Таким образом, ЧД — это уникальный объект, который виден одновременно со всех сторон. Наблюдаемая тень от ЧД представляет собой



*Рис. 6. Детальное изображение горизонта событий черной дыры Шварцшильда внутри ее тени (самый внешний круг).*

*Здесь пунктирный круг соответствует воображаемому нелинзированному изображению горизонта событий. Внутренний сплошной круг представляет собой гравитационно-линзированное изображение передней полусферы горизонта событий (указаны соответствующие параллели и меридианы). Внешний сплошной круг соответствует линзированному изображению задней полусферы горизонта событий черной дыры, которая, таким образом, видна одновременно со всех сторон.*

*Из статьи В.И. Докучаева и Н.О. Назаровой, ЖЭТФ, т. 155, вып. 3, стр. 1–9, 2019).*

линзированное изображение ее фотонной сферы. Поскольку внутри фотонной сферы фотоны двигаются по замкнутым траекториям, тень ЧД кажется темной. Наличие тени является решающим доказательством того, что исследуемый компактный объект является ЧД. И такое доказательство было получено научным консорциумом ЕНТ в 2019 году (см. рис. 4). Это доказательство носит не только качественный, но и количественный характер, поскольку наблюдательный

диаметр тени совпадает с теоретическим, вычисленным для известной из независимых данных массы сверхмассивной ЧД  $6.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$ . В последнее время научный консорциум ЕНТ провел дополнительную обработку своих радиоинтерферометрических наблюдений центра галактики М87 с учетом поляризации радиоизлучения и получил распределение силовых линий магнитного поля в ближайших окрестностях сверхмассивной ЧД (см. рис. 7).

На очереди стоит построение изображения тени вокруг сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики.



*Рис. 7. Распределение силовых линий магнитного поля в ближайших окрестностях сверхмассивной ЧД в ядре галактики М87, восстановленное научным консорциумом ЕНТ с учетом поляризации наблюдаемого радиоизлучения*

В России разрабатывается проект космического радиointерферометра «Миллиметронтрон», у которого угловое разрешение будет достигать  $10^{-8}$  секунды. С помощью этого интерферометра можно будет наблюдать тени от десятков сверхмассивных ЧД в ядрах различных галактик, что приведет к еще большему прогрессу в исследованиях таких экстремальных и захватывающе интересных объектов, как ЧД.

## Дополнительная литература

1. А.М.Черепашук (редактор), Многоканальная астрономия, Изд-во Век-2, Фрязино, 2019.
2. А.М.Черепашук, Открытие гравитационных волн: новый этап в исследованиях черных дыр, Успехи Физических наук, т. 186, стр. 1001, 2016.
3. К.А.Постнов, А.М.Черепашук, Черные дыры, сингулярности и центр Галактики, Земля и Вселенная, №1, стр. 5, 2021.

# КАК УЗНАЛИ ВОЗРАСТ ЗВЕЗД И ГАЛАКТИК?

**А.В. Засов,**

*доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, заведующий отделом внегалактической астрономии Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

*„Ничто не вечно, немного долговечно,  
конец у вещей различный,  
но все, что имеет начало, имеет и конец.“*

Сенека (младший), I век н.э.

Мудрость, заключенная в эпиграфе, имеет глубочайший смысл, и абсолютно верна, хотя вряд ли философ Сенека относил ее к звездам. Со времен Аристотеля, который жил на несколько столетий раньше, было принято условно делить мир на подлунный, бренный, и идеальный неизменный мир эфира и небесных тел. Это казалось логичным и ничему не противоречило: есть мир людей и вещей, есть идеальный мир богов (или Бога). Где же ему еще быть?

Действительно, за все время существования человечества, если не считать исключительно редких вспыхнувших на короткое время звезд, о которых мало кто знал, на небе не

появилось и не исчезло ни одной звезды из тысяч, доступных человеческому глазу. Проходили столетия, менялось представление о природе вещей, но только в 19 веке стало возможным говорить о звездах как о физических объектах с определенными характеристиками (что в античном и раннехристианском мире сочли бы за кощунство). И только в середине 20 века, благодаря развитию физики и методов астрономических наблюдений, был поставлен на научную платформу вопрос о возрасте звезд. Стало очевидным, что это газовые тела с очень высокой температурой внутри и что термоядерные ядра звезд, эти энергетические батарейки, не вечны и рано или поздно должны «садиться», приводя при этом к перестройке всей внутренней структуры звезды, меняя ее температуру, размер и светимость. Пожалуй, самый важный научный вывод заключался в том, что возраст звезд не одинаков, то есть они возникли не одновременно. И если звезды — красные гиганты могут быть очень старыми, то голубые звезды высокой светимости — это действительно молодые объекты с возрастом порядка миллиона лет, а не «омолодившиеся» старички, случайно влетевшие в плотные газовые облака и вобравшие в себя много упавшего на них газа. Значит, образование звезд продолжается. Но и этот процесс когда-то имел начало.

Определение возраста звезд и сейчас не простая задача. Современные методы оценки их возрастов сводятся к сопоставлению наблюдаемых характеристик звезд (прежде всего, их температуры и светимости) с теоретически рассчитанными моделями звездной эволюции. Хотя точность оценок возраста старых звезд не слишком велика, потому что эти звезды меняются очень медленно, все же можно считать, что звезд старше 13–14 миллиардов лет, по-видимому, в природе нет совсем, причем не только в нашей, но и в других галактиках. Это означает, что мир звезд и галактик ограничен по времени существования.

Любопытно, что вопрос о том, что появилось в природе сначала — звезды или галактики (яйцо или курица) — еще

ждет своего решения. Предполагается, что первыми возникли звезды очень большой массы, не содержащие, в отличие от современных звезд, в своем составе никаких химических элементов, кроме водорода и первичного гелия. Их условно назвали звездами Населения III; по аналогии с Населением I (химический состав, как у Солнца) и Населением II (низкое содержание тяжелых элементов, как у звезд шаровых скоплений). Они возникли и осветили темный дозвездный мир, когда галактики только начали формироваться из темной материи и сжимающегося холодного газа. С этих гипотетических звезд и пошла, возможно, история нашей звездной Вселенной. Их неизбежные взрывы быстро «засорили» межзвездный газ элементами, тяжелее гелия, что резко облегчило формирование обычных звезд, доживших до настоящего времени (дело в том, что даже небольшое количество тяжелых элементов способствует быстрому охлаждению газа, что важно для превращения разреженного газа в звезды). Уловить свет этих первых звезд с большого расстояния, заглянув в далекое прошлое нашего мира — это одна из задач, поставленная перед новым большим космическим телескопом имени Джеймса Вебба.

С возрастом галактик дело обстоит сложнее. Очевидно, что формирование галактик началось с появлением первых звезд, в первые сотни миллионов лет после начала расширения Вселенной. Но существуют ли галактики, которые возникли значительно позже?

Решение этого вопроса осложняется тем, что ни у какой галактики нет своего «дня рождения». Рождение галактик — не одномоментный процесс, он растянут на миллиарды лет. Как тогда сравнивать их возраст, если каждая галактика может содержать звезды разных возрастов? Разумно принять за возраст галактики возраст наиболее старых звезд в ней, но если в галактике идет интенсивное звездообразование, то вклад старых звезд в ее свет может быть ничтожен, и их присутствие трудно обнаружить. Поэтому нелегко, а иногда

и просто невозможно отличить молодую галактику от старой, которая испытывает или испытала недавно мощный всплеск звездообразования.

Проще вопрос поставить так: наблюдаются ли галактики, в которых звезды полностью сформировались совсем недавно по астрономическим меркам? Такие молодые галактики действительно существуют. К ним относят, например, небольшие газо-звездные системы, охваченные звездообразованием, в приливных структурах некоторых взаимодействующих галактик. Это карликовые объекты, возникшие при частичном разрушении сталкивающихся или просто сильно сблизившихся галактик. Они получили название приливных карликов. Что касается таких массивных галактик, как наш Млечный Путь или Туманность Андромеды, то их бурное формирование имело место лишь в очень далеком прошлом. В принципе, процесс их взросления можно исследовать, наблюдая с помощью крупных телескопов галактики на большом расстоянии (на больших красных смещениях), поскольку только в этом случае, благодаря конечности скорости света, мы непосредственно видим события далекого прошлого.

Образование звезд в галактиках постепенно затухает. Будет ли конец нашего звездного мира? Несомненно! (см. эпиграф). Это произойдет, когда исчерпают ядерное топливо и остынут самые долгоживущие, маломассивные звезды, хотя до этого времени — еще сотни миллиардов лет. Но не будем говорить о том, чем все кончится. Мы пока не умеем заглядывать так далеко в глубь времён!



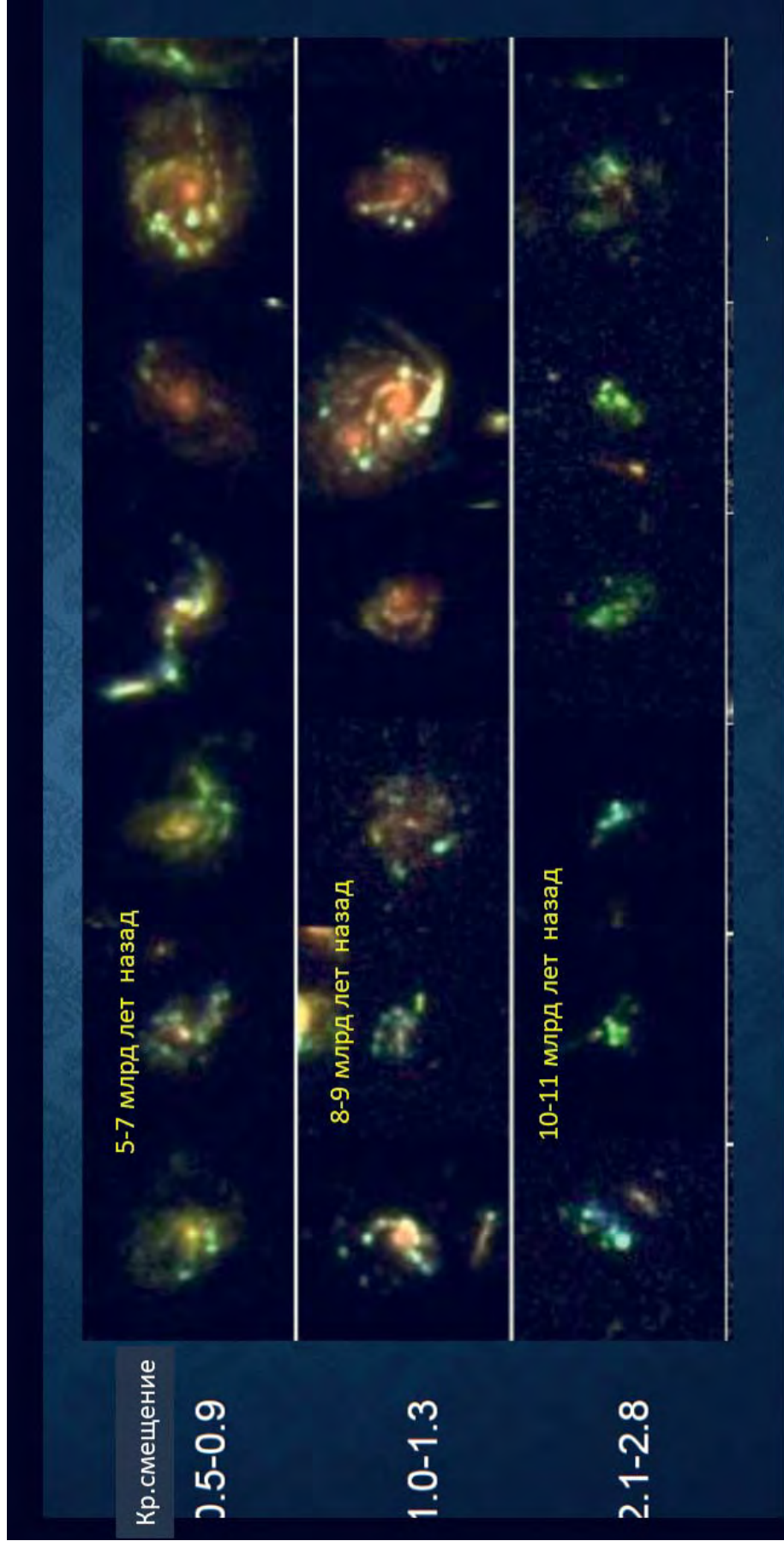


Рис. 1. Пример изображений галактик, наблюдаемых в далеком прошлом. Космический телескоп им. Хаббла (НАСА)

# ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

**Н.Н. Самусь,**

*доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН  
и Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга  
МГУ им. М.В. Ломоносова,  
сопредседатель Международной общественной организации  
"Астрономическое Общество"*

Переменные звезды — традиционная область астрофизики и звездной астрономии. Исследования переменных звезд помогают изучать физические характеристики звезд, их эволюцию, определять расстояния до звездных систем, в которые они входят.

## Что такое переменная звезда

Переменная звезда — это звездный объект, блеск которого меняется заметным образом по причинам, не связанным с земной атмосферой. Блеск некоторых звезд меняется на десятки звездных величин. Минимальный масштаб изменений, требующийся для признания звезды переменной, не определен, что сегодня создает проблемы для составителей каталогов переменных звезд.

# Начало исследований переменных звезд в нашей стране.

## Общий каталог переменных звезд

В России исследования переменных звезд начались еще в конце XIX века. В 1896 г. С.Н. Блажко (впоследствии член-корреспондент АН СССР) инициировал регулярное фотографирование звездного неба на телескопах Московской обсерватории на Пресне. Директор Московской обсерватории В.К. Цераский и его жена, Л.П. Цераская, начали массовые открытия переменных звезд по материалам этой коллекции астрономических негативов.

Член-корреспондент АН СССР П.П. Паренаго инициировал ведение в ГАИШ МГУ подробной картотеки наблюдательных сведений о переменных звездах из литературы. После Второй мировой войны Международный астрономический союз поручил московским астрономам составление и публикацию каталогов переменных звезд. Первый каталог (Общий каталог переменных звезд — ОКПЗ) вышел в 1948 г., его авторами стали П.П. Паренаго и профессор Б.В. Кукаркин. Впоследствии работу возглавил доктор физико-математических наук П.Н. Холопов, а затем — автор этой статьи.



*Рис. 1. Член-корреспондент АН СССР Павел Петрович Паренаго (1906–1960), один из основателей ОКПЗ*



*Рис. 2. Профессор  
Борис Васильевич Кукаркин (1909–1977),  
один из основателей ОКПЗ*



*Рис. 3. Доктор физико-математических наук  
Павел Николаевич Холопов (1922–1988),  
руководитель проекта ОКПЗ в 1977–1988 гг.*



*Рис. 4. Команда проекта ОКПЗ у входа в ГАИШ МГУ. 2021 г.*

Всего в свет вышло четыре издания ОКПЗ в виде книг, от однотомного первого издания до пятитомного четвертого издания. В настоящее время ведение ОКПЗ продолжается в электронной форме. В каталог к 2022 году включено свыше 58 000 переменных звезд, не считая так называемых «звезд, заподозренных в переменности блеска», которым посвящены специальные каталоги, также ведущиеся в нашей стране, и переменных звезд в других галактиках.

Около 20 лет назад Американская ассоциация наблюдателей переменных звезд (AAVSO) учредила так называемый Международный регистр переменных звезд (VSX). Принципы ведения этого списка отличаются от принципов составления ОКПЗ (предполагающих использование опубликованных данных и



Рис. 5. Титульная страница Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ) в Интернете

авторизацию информации составителями каталога) и позволяют создать почти исчерпывающий список. На 5 января 2022 года в VSX входит 2 116 241 объект (переменные и заподозренные переменные звезды, в том числе внегалактические). Составители ОКПЗ и VSX сотрудничают друг с другом.

## Некоторые направления исследований переменных звезд в СССР и России

Краткий обзор этого раздела совершенно не претендует на полноту.

Важнейшим достижением советской астрофизики стало открытие клапанного механизма возбуждения пульсаций цефеид. Цефеиды — сверхгиганты, пульсирующие с периодами от суток до нескольких десятков суток. Блеск при этом меняется примерно на 1 звездную величину.

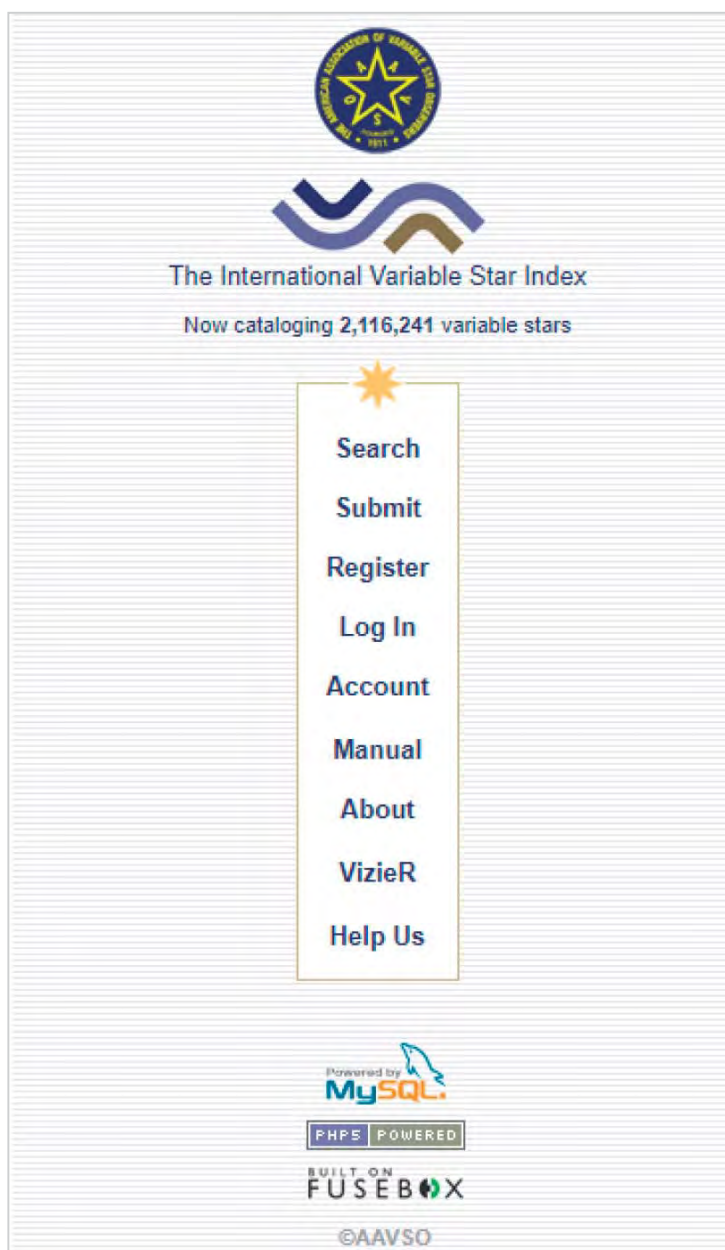


Рис. 6. Титульная страница AAVSO VSX от 5 января 2022 г.

В 1953 г. физик из г. Горький С.А. Жевакин обосновал механизм возбуждения пульсаций, связанный с наличием во внешних слоях цефеиды сферического слоя, в котором в течение цикла пульсаций гелий то ионизуется до двукратно ионизованного состояния, то рекомбинирует до однократно ионизованного состояния. Аналогичный механизм может работать и для некоторых других типов пульсирующих звезд.



*Рис. 7. Советский физик  
Сергей Александрович Жевакин (1916–2001),  
в 1953 г. сумевший объяснить пульсации цефеид*

Лидером исследований цефеид в России является доктор физико-математических наук Л.Н. Бердников. Больше всего его интересует изучение изменений периодов цефеид, которые удастся связать с эволюцией этих сверхгигантов. В 2007 г. цикл работ Л.Н. Бердникова, А.С. Расторгуева и Н.Н. Самуся по исследованиям цефеид был удостоен премии РАН имени Ф.А. Бредихина.

Профессор В.М. Липунов (ГАИШ МГУ), широко известный как астрофизик-теоретик, в последние десятилетия прославился выдающимся наблюдательным проектом. Под его руководством была создана сеть робот-телескопов «Мастер» на территории России и нескольких зарубежных стран. Среди многих выдающихся результатов, полученных телескопами сети «Мастер», назовем быстрое оптическое отождествление так называемой килоновой в галактике NGC 4993, вспыхнувшей в результате слияния двух нейтронных звезд, вызвавшего гравитационно-волновое событие 17 августа 2017 г.





*Рис. 8. Доктор физико-математических наук,  
лауреат премии им. Ф.А. Бредихина  
Леонид Николаевич Бердников (ГАИШ МГУ),  
много лет детально изучающий изменения пульсационных периодов цефеид*



*Рис. 9.  
Руководитель проекта «Мастер» профессор В.М. Липунов (ГАИШ МГУ)*



*Рис. 10. Сеть телескопов «Мастер»*



*Рис. 11. Башня телескопа «Мастер» на острове Тенерифе (Канарские острова).  
На заднем плане — вулкан Тейде*

В Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) доктор физико-математических наук Е.П. Павленко проводит многолетнюю программу исследования катаклизмических переменных — тесных двойных систем с белыми карликами. Сотрудник КрАО К.Н. Гранкин с успехом ведет исследования молодых запятненных звезд, переменность которых в основном обусловлена осевым вращением, в 2022 году ожидается защита его докторской диссертации.



*Рис. 12. Доктор физико-математических наук  
Елена Петровна Павленко*



*Рис. 13. Константин Николаевич Гранкин*

## Некоторые перспективы

Гарвардская обсерватория, обладающая крупнейшей коллекцией астрономических фотографий звездного неба в мире, осуществила полный перевод этой фототеки в цифровую форму с помощью специально созданного оборудования. Другие обсерватории подхватили процесс оцифровки, пользуясь коммерческими сканерами. Ведется эта работа и в Москве, в результате удалось открыть около тысячи новых переменных звезд.



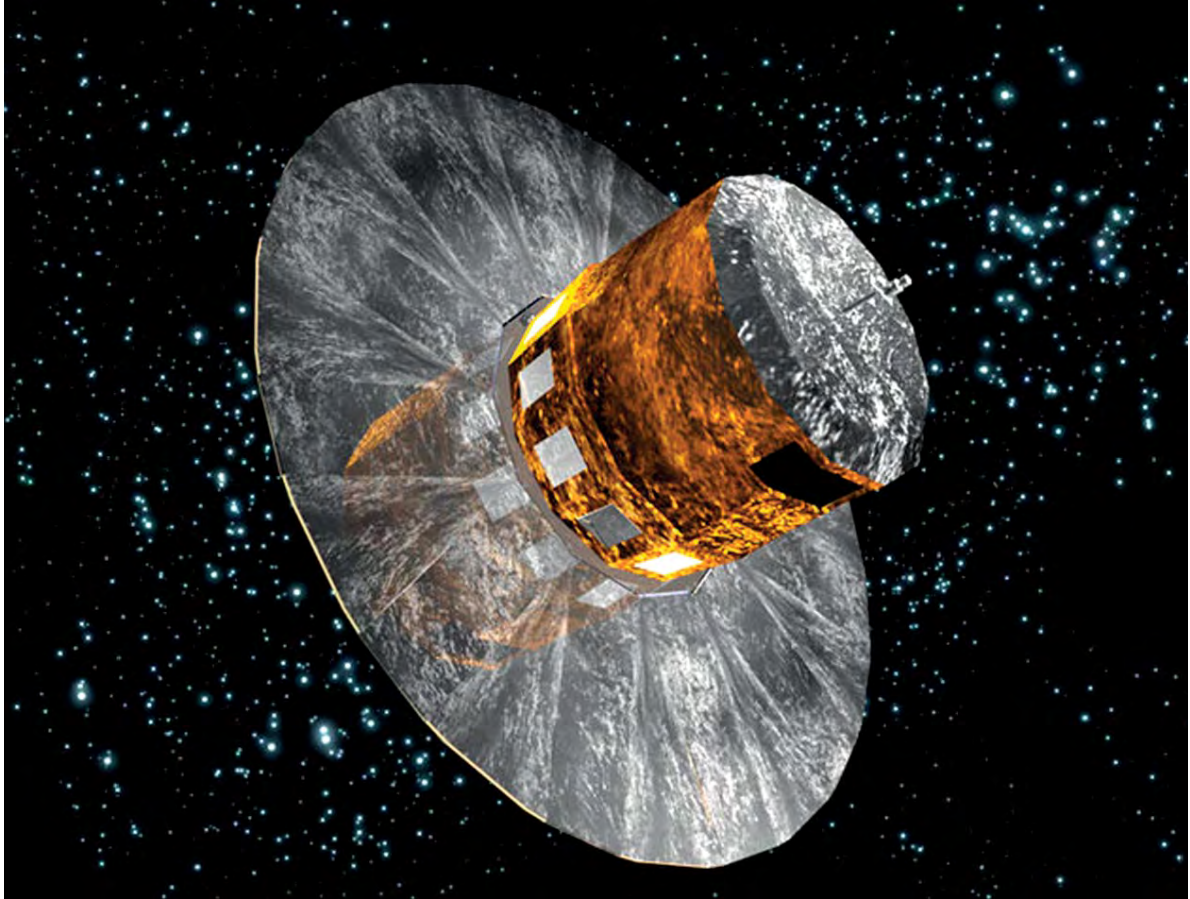
*Рис. 14. Один из создателей прибора для оцифровки Гарвардской фототеки Боб Симко у своего прибора. Апрель 2009 г.*

Новые перспективы открывают автоматические обзоры звездного неба с применением современных приемников излучения; некоторые из них, например, обзор ASAS-SN

Университета штата Огайо, позволили открыть множество новых переменных звезд. Продолжающий работу космический аппарат Gaia Европейского космического агентства не только предоставил в распоряжение астрономов астрометрическую информацию (координаты, собственные движения, параллаксы звезд) небывалой точности, но и провел фотометрические наблюдения, позволившие открыть тысячи переменных звезд.



*Рис. 15. Сканер, применяемый для оцифровки фототеки ГАИШ МГУ*



*Рис. 16. Космический аппарат Gaia Европейского космического агентства*

## Переменные звезды и любители астрономии

Исследования переменных звезд — традиционная область активности любителей астрономии, где они могут внести реальный вклад в науку. Речь идет и о визуальных наблюдениях переменных звезд, и о фотометрии при помощи ПЗС-приемников излучения, сегодня вполне доступной для многих любителей, и о применении «раскопок» в фотометрических данных, находящихся в открытом доступе (так называемый “data mining”).

Если любители, получившие результаты, имеющие научное значение, могут написать об этом заметку на английском языке, приглашаем их к публикации в профессиональном

электронном журнале «Переменные звезды (Variable Stars)», который был основан Б.В. Кукаркиным (конечно, как традиционный «бумажный» журнал) в 1928 году, когда его создателю было всего 19 лет.

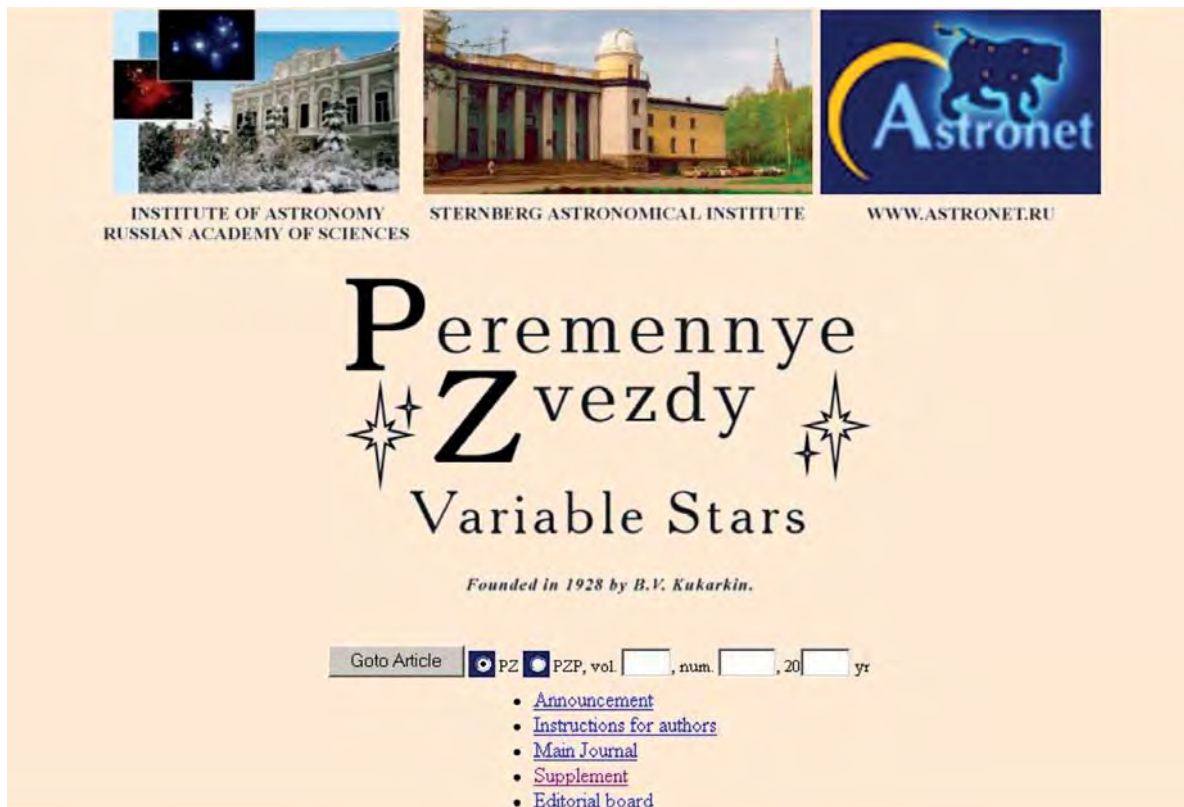


Рис. 17. Электронный журнал «Переменные звезды»  
[www.astronet.ru/db/varstars/](http://www.astronet.ru/db/varstars/)

# ПРОБЛЕМА АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ

**С.А. Язев,**

*доктор физико-математических наук,  
Иркутский государственный университет,  
заместитель сопредседателя Международной общественной  
организации «Астрономическое Общество»*



Об астероидной опасности много говорится в СМИ с самого начала текущего века. Сообщений об очередном астероиде, который уничтожит планету и приведет к «концу света», за



это время было уже немало. Проблема отражена в фантастической литературе и фантастических фильмах (например, голливудский фильм 2021 года «Не смотри наверх!»). В результате отношение общества к этой проблеме оказалось сложным (и соответствующая фобия, и эффект многократного сигнала «волки!», после которого волки так и не появились). Поэтому вопрос о том, насколько реальна в действительности астероидная опасность, требует специального рассмотрения.

То, что астероиды сталкиваются (или, по крайней мере, сталкивались в прошлом) с планетами Солнечной системы, очевидно. Многочисленные следы ударов астероидов и ядер комет наблюдаются на поверхности планет земной группы (Меркурия, Венеры, Земли и Марса), а также их спутников — Луны, Фобоса и Деймоса. Значение плотности кратеров диаметром более 10 км, приходящихся на 1 миллион квадратных километров на Луне составляет 392, на Меркурии (по данным съемок «Маринера-10», отснявшего 30 % поверхности планеты) — 360, на Марсе — 210.

Луна, находящаяся в ближайшей окрестности Земли, испещрена ударными кратерами. На видимой половине Луны, обращенной к Земле, насчитывается около 300 000 кратеров диаметром более 1 км, в том числе около 15 000 кратеров диаметром более 10 км. Исследования с помощью космических аппаратов показали, что на Луне есть и кратеры меньших размеров (до нескольких сантиметров). На обратной стороне Луны количество молодых кратеров оказалось вдвое больше, чем на видимой. Здесь находятся огромные ударные бассейны — безымянный рядом с Морем Восточным (1100 км), кратеры Герцшпрунг (645 км), Королев (525 км), Аполлон (485 км). Очевидно, что Земля, находящаяся рядом с Луной, в свое время испытала не меньшее количество импактных событий, в отличие от безатмосферных планет, почти не сохранивших следов ударов. Тем не менее, даже на Земле известно около 230 крупных кратеров, для 160 из которых их импактное происхождение доказано. Возраст наиболее крупных из

них (диаметр до 200 км) близок к 2 млрд лет. Более древние образования на нашей планете не сохранились.

Огромное количество ударных кратеров обнаружено на спутниках планет-гигантов (Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна), а также ледяных объектах Солнечной системы — на карликовой планете Плутон, на ледяном астероиде Аррокот, а также на исследованных ядрах комет.

Современные оценки показывают, что максимум числа столкновений приходится на эпоху так называемой поздней тяжелой бомбардировки — 3.8–4.2 млрд лет тому назад. Тем не менее, в современную эпоху столкновения (гораздо более редкие) иногда случаются. В качестве примера можно указать падение небольшого астероида на планету Юпитер, наблюдавшееся 19 июля 2009 г. Выделившаяся при этом энергия соответствует энергии взрыва примерно пяти гигатонн тротила. На Луне только в течение семи лет (с 2014 по 2020 гг.) американским космическим аппаратом LRO обнаружено появление новых 222 кратеров размерами от 3 до 43 м. Учитывая, что типичное соотношение характерного размера тела-ударника к диаметру появившегося кратера примерно составляет 1 : 20, размеры упавших тел — от 10–15 см до 2 м. Такие тела преимущественно разрушаются при входе в земную атмосферу, а при столкновении с Луной беспрепятственно достигают ее поверхности.



*Рис. 1. Море Восточное на Луне — древний след грандиозного столкновения (космический аппарат «LRO», НАСА)*

# Астероидная опасность

В прошлом тела Солнечной системы претерпели огромное количество столкновений, которые во многом определяли процессы формирования и эволюции планет. Важным вопросом является проблема вероятности столкновений астероидов с Землей в настоящее время. Очевидно, что столкновение с Землей в принципе возможно только для объектов, чьи орбиты проходят вблизи орбиты Земли. Такие объекты принято подразделять на четыре группы астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Объекты этих четырех типов — Амура, Аполлона, Атона и Атиры — иногда называют АААА-астероидами.

**1. Астероиды типа Амура.** Астероиды, перигелии (наиболее близкие к Солнцу точки орбит) которых приближаются, но не достигают афелия (наиболее далекая от Солнца точка орбиты) орбиты Земли. В перигелии они приближаются к земной орбите с внешней стороны, но никогда ее не пересекают, поэтому безопасны. Могут представлять опасность для Земли только в отдаленном будущем, в случае изменения параметров своих орбит. Общее количество объектов с размерами больше 1 км оценивается в 2–3 тысячи.

**2. Астероиды типа Аполлона.** Астероиды с перигелийными расстояниями, меньшими 1,017 а. е. (это афелийное расстояние Земли), и большими полуосями орбит (средними расстояниями до Солнца), превышающими 1 а. е. К этому типу относятся 2/3 всех известных объектов, сближающихся с Землей. Поскольку их орбиты проникают снаружи внутрь орбиты Земли, столкновение их с Землей возможно. Из-за того, что плоскости орбит этих астероидов в большинстве случаев наклонены к плоскости орбиты Земли, в пространстве орбиты не пересекаются, а лишь скрещиваются, и пересечение орбит наблюдается только в проекции на плоскость эклиптики. Последнее замечание касается и следующего класса астероидов — типа Атона.

**3. Астероиды типа Атона.** Астероиды с большими полуосями, меньшими, чем 1 а. е., но афелийными расстояниями большими, чем 0,983 а. е. (это перигелийное расстояние Земли). Эти малые планеты движутся внутри орбиты Земли, и только в афелии могут пересекать ее с внутренней стороны. Столкновение их с Землей также возможно. Астероидов этого типа менее 1/10 от общего числа известных опасных астероидов. Общее количество астероидов типа Аполлона и Атона с размерами больше 1 км оценивается в 1500.

**4. Астероиды типа Атиры.** Астероиды, которые движутся полностью внутри орбиты Земли. В ближайшем будущем они так же безопасны, как астероиды группы Амура. В 1998 г. открыт первый объект типа Атиры. Общее количество неизвестно. Наблюдения таких астероидов крайне затруднены, поскольку они наблюдаются преимущественно с дневной стороны Земли.

Среди астероидов четырех указанных типов отдельно выделяют потенциально опасные астероиды — ПОА (Potentially Hazardous Asteroids). К ним относят все объекты, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0.05 а.е. (около 7.5 млн км), и чья абсолютная звездная величина (показатель яркости на небе) не превышает значения 22 $m$ . Ограничение по абсолютной величине связано с тем, что при условно принятом альбедо астероида 0.13 объект с абсолютной звездной величиной, большей 22 $m$ , имеет размеры меньше 150 м. Столкновение такого астероида с Землей не очень опасно — в худшем случае, оно может вызвать локальную катастрофу.

*Таким образом, потенциально способны столкнуться с Землей только астероиды типов Аполлона и Атона. Для столкновения необходимо (но, к счастью, недостаточно), чтобы точка пересечения орбит астероида и Земли лежала в пределах от перигелия Земли (0,983 а. е.) до ее афелия (1,017 а. е.).*

По состоянию на начало 2022 г. известны около 28000 околоземных объектов всех типов, в том числе более 10000 типа Амура, более 15600 типа Аполлона, около 2200 типа Атона, 27 типа Атиры, а также чуть более 117 околоземных комет. Около 2250 из общего числа этих объектов (8%) отнесены к разряду потенциально угрожающих Земле. Среднее количество обнаруживаемых в течение суток новых (ранее неизвестных) околоземных объектов в 2020–2021 гг. выросло до 9–10. 2021 год стал первым в истории, в течение которого были открыты более 3000 околоземных объектов.

Орбиты астероидов, сближающихся с Землей, стохастически меняются на интервалах времени порядка десятков тысяч лет из-за гравитационного воздействия крупных планет, вблизи которых периодически проходят астероиды. Близкие (тесные) прохождения могут изменять орбиты достаточно быстро и существенно. Поэтому опасные сегодня астероиды со временем могут стать безопасными и наоборот. Кроме того, расчеты показали, что существуют такие типы гравитационных возмущений со стороны крупных планет, которые «перебрасывают» некоторые астероиды из внешних областей Главного пояса во внутренние с большими эксцентриситетами, в результате семейство опасных астероидов типа Аполлона регулярно пополняется.

Пока что все ***известные астероиды остаются безопасными для Земли*** на протяжении, по крайней мере, ближайших 100 лет. Наиболее опасным считается предстоящее сближение с Землей объекта типа Атона — астероида 99942 Апофис, который должен пройти всего в 36 000–38 000 км от поверхности Земли 13 апреля 2029 г. Размеры Апофиса оценены в пределах — 270–340 м. Ожидается возможное разрушение нескольких спутников связи, находящихся на так называемых стационарных орбитах на указанной высоте над экватором Земли. Однако основная опасность заключается в том, что близкое прохождение Апофиса в 2029 г. вызовет очередное изменение его орбиты, в результате чего астероид

станет объектом типа Аполлона с большой полуосью, превышающей 1 а. е. Величина возмущения критически зависит от минимального расстояния во время прохождения вблизи Земли в 2029 г. и пока не может быть точно рассчитана. Среди возможных изменений траектории, к сожалению, есть такие, которые приведут к новым последующим опасным сближениям с Землей и даже крайне маловероятному столкновению, начиная с 2036 г. Остальные известные астероиды безопасны: наиболее тесное сближение крупного объекта (астероид 2340 Хатор, размеры 350 м) состоится 21 октября 2086 на расстоянии 833 000 км.

Современные возможности наблюдений позволяют обнаруживать астероиды вблизи Земли в большем количестве, чем ранее, и достаточно заблаговременно. В 2007 году был открыт

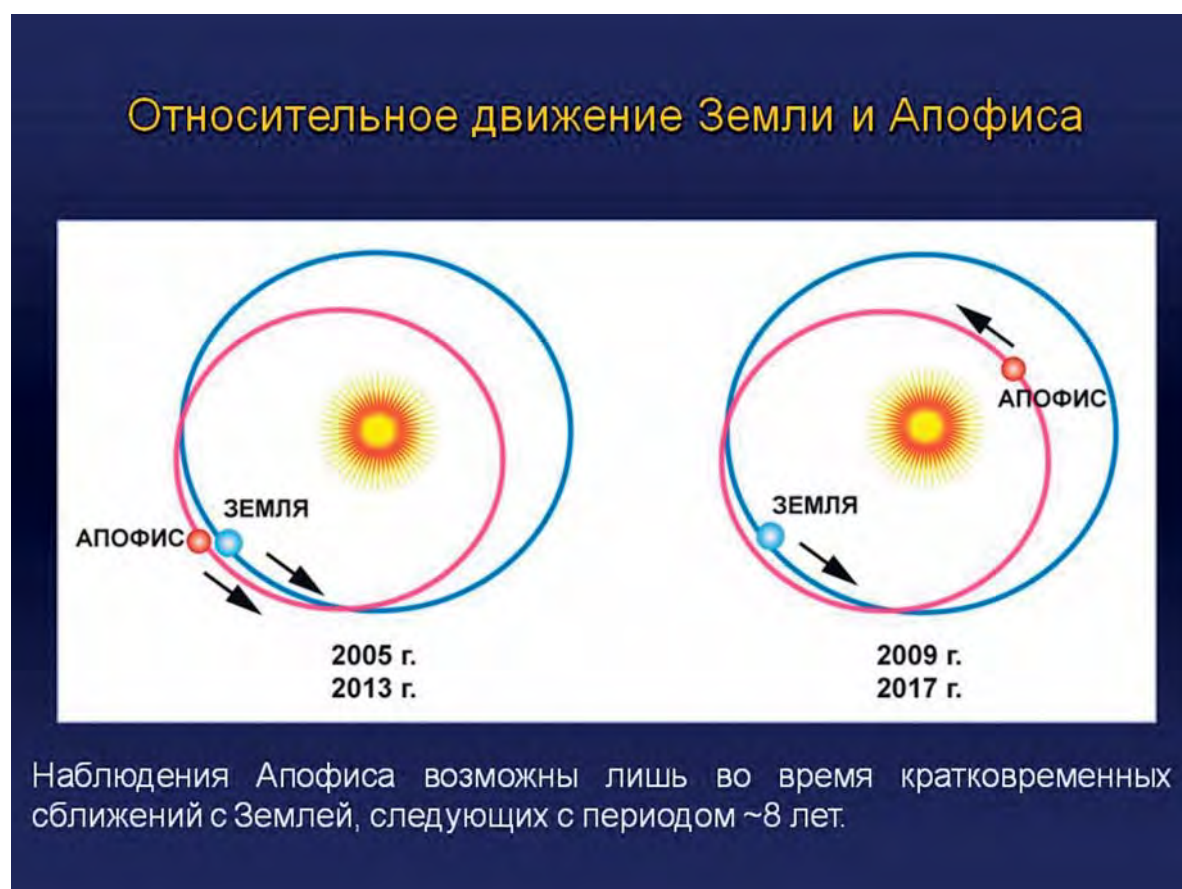


Рис. 2. Схема орбит Земли и астероида 99942 Апофис

астероид 2007 TU24 с характерным размером 300 м — за 4 месяца до его прохождения вблизи Земли. Это означает, что еще недавно именно с такой характерной заблаговременностью до сближения с Землей открывались сравнительно крупные околоземные астероиды.

В настоящее время подобные сравнительно крупные объекты (с характерным размером порядка многих десятков и первых сотен метров) открываются еще более заблаговременно — за многие месяцы или даже годы до сближения. В 2022 г. ожидается завершение работ по вводу в строй специального телескопа LSST имени Веры Рубин с диаметром зеркала 8,36 м и большим полем зрения (порядка 3 угловых градусов). Темпы открытия околоземных астероидов с применением этой техники телескопа должны существенно увеличиться, особенно вырастет число малых астероидов с размером 1–5 м, пролетающих вблизи Земли.

Все известные околоземные астероиды оказались не опасными (либо они проходят мимо Земли и не угрожают ей на протяжении ближайших десятилетий, либо совсем небольшие). Потенциальную опасность представляют еще не открытые астероиды, о которых мы пока ничего не знаем. Астероид 2002 EM7 диаметром 60 м, прошедший примерно в 580 000 км (1,5 радиуса орбиты Луны) от Земли, был открыт в 2002 г. только тогда, когда он уже начал удаляться, пролетев вблизи нашей планеты. В том же 2002 г. астероид 2002 MN диаметром около 100 м прошел вблизи Земли втрое ближе Луны — на расстоянии 115 000 км, будучи обнаруженным всего лишь за три дня до максимального сближения с Землей. Астероид 1991 VA диаметром в 9 м прошел 17 января 1991 г. на расстоянии всего в 170 000 км от Земли — вдвое ближе Луны.

Подобные примеры указывают на то, что а) астероидная опасность реальна и ранее явно недооценивалась, б) существующие средства и методы обнаружения и мониторинга АСЗ нуждаются в значительном совершенствовании.



*Рис. 3. Радиоизображение околоземного астероида 3200 Фазтон, полученное с помощью радара Аресибо, США*

## Туринская шкала астероидной опасности

Летом 1999 г. на конференции по астероидной опасности в г. Турине Международный астрономический союз (МАС) официально принял шкалу астероидной опасности, разработанную профессором Бинзелом. Согласно этой шкале, вероятность столкновения Земли с астероидом оценивается в рамках нижеприведенной десятибалльной шкалы.

0. Вероятность столкновения равна нулю или ниже вероятности столкновения Земли с неизвестным небесным телом того же размера в течение нескольких десятилетий. Эту же оценку получают небольшие небесные тела, которые даже в случае столкновения не смогут достичь поверхности вследствие разрушения в атмосфере Земли.

1. Вероятность столкновения чрезвычайно низка или равна вероятности столкновения Земли с неизвестным небесным телом того же размера в течение нескольких десятилетий.



2. Небесное тело совершит сближение с Землей, однако столкновение при этом маловероятно.

3. Тесное сближение с Землей с вероятностью столкновения 1 % и более. В случае столкновения возможны локальные разрушения.

4. Тесное сближение с Землей с вероятностью столкновения 1 % и более. В случае столкновения возможны региональные разрушения.

5. Тесное сближение с Землей с серьезной вероятностью столкновения, которое может вызвать региональные разрушения.

6. Тесное сближение с Землей с серьезной вероятностью столкновения, которое может вызвать глобальную катастрофу.

7. Тесное сближение с Землей с очень высокой вероятностью столкновения, которое может вызвать глобальную катастрофу.

8. Столкновение, способное вызвать местные разрушения (подобные события происходят раз в 1000 лет).

9. Столкновение, способное вызвать глобальные разрушения (подобные события происходят раз в 1000–100 000 лет).

10. Столкновение, способное вызвать глобальную катастрофу (подобные события происходят раз в 100 000 лет и более).

На сегодняшний момент астероиды, которые имели бы по Туринской шкале оценку выше 0 баллов, неизвестны. Тем не менее, как указано выше, открытие таких, ныне неизвестных, объектов не исключено в будущем.

## Последствия импактных событий

Как указано выше, на поверхности планет земной группы и их спутников обнаружены следы большого количества импактных событий (столкновений) с астероидами и ядрами комет. Земля не является исключением. Несмотря на

действие эффективных механизмов разрушения импактных кратеров (тектонические процессы, действие воды, ветра, биосферы), на Земле обнаружено не менее 230 ударных кратеров различного возраста и различных размеров. В их числе 5 крупнейших кратеров с размерами более 100 км и 32 кратера с размерами в пределах от 20 до 100 км. Данные о наиболее крупных кратерах приведены ниже:

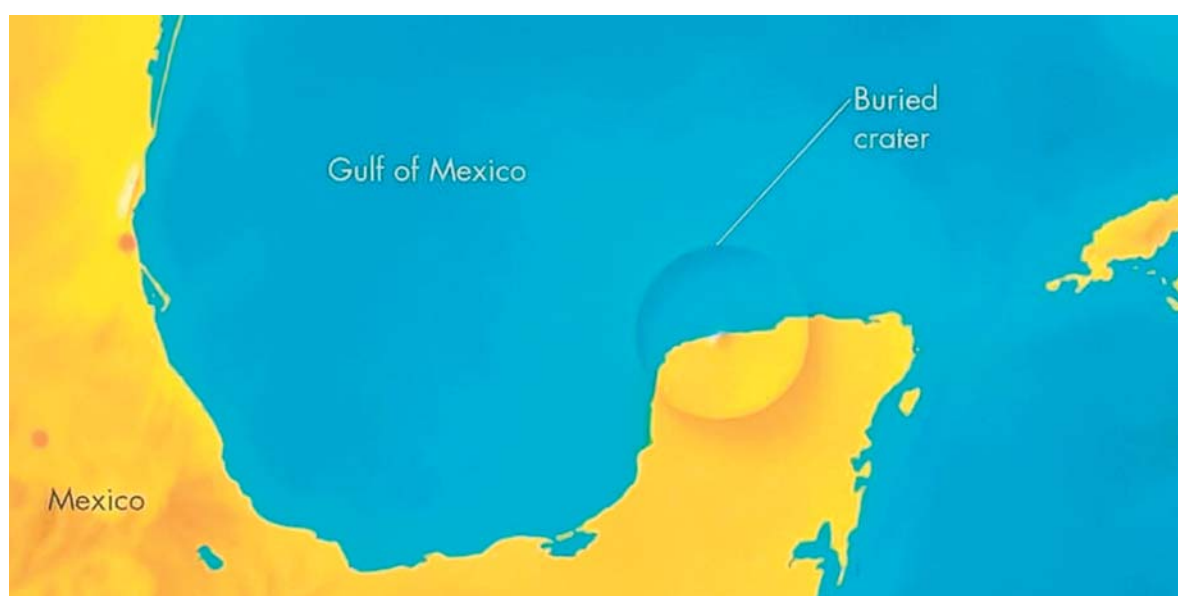
**Попигайский кратер** (Россия, вблизи северной границы Анабарского щита, широта  $71^{\circ} 39'$  с. ш., долгота  $111^{\circ} 11'$  в. д.) имеет диаметр 100 км, возраст ударного бассейна — 35,7 млн лет. Импактор представлял собой каменный астероид диаметром 5–8 км, падавший со скоростью 15–24 км/с.



*Рис. 4. Борт котловины Попигайского ударного кратера (часть кольцевого вала), Северная Сибирь. Минералы горных пород несут следы огромных давлений. Фото В. Горшкова*

**Кратер Маникуаган** (Квебек, Канада, широта  $51^{\circ} 23'$  с. ш., долгота  $68^{\circ} 42'$  з. д.), имеет диаметр 100 км, возраст 214 млн лет.

**Кратер Чиксулуб** (северное побережье полуострова Юкатан, Мексика, широта  $21^{\circ} 20'$  с. ш., долгота  $89^{\circ} 30'$  з. д.) имеет диаметр 170–180 км, возраст 65 млн лет. Импактор представлял собой астероид диаметром 10–14 км, падавший со скоростью 12–15 км/с.



*Рис. 5. Кратер Чиксулуб расположен частично на суше, частично на дне акватории Мексиканского залива*

**Кратер Садбери** (Онтарио, Канада, широта  $46^{\circ} 38'$  с. ш., долгота  $81^{\circ} 11'$  з. д.) имеет диаметр 250 км, возраст 1850 млн лет. Импактор обладал характеристиками, предположительно сходными с импактором Вредефорт.

**Кратер Вредефорт** (Южная Африка, широта  $27^{\circ} 00'$  ю. ш., долгота  $27^{\circ} 30'$  в. д.) имеет диаметр 300 км, возраст 2023 млн лет. Импактор представлял собой астероид диаметром 14 км при скорости 15 км/с.

Нет сомнений, что на дне мирового океана скрыты под осадочными породами другие крупные кратеры.

Рассмотрим последствия крупного импактного события, породившего кратер Чиксулуб. Расчеты показали, что падение десятикилометрового астероида могло привести к гло-

бальной катастрофе. Энергия удара оценивается величиной порядка  $10^{22} - 10^{24}$  Дж. При падении в океан происходит мощнейшее землетрясение, возникает волна цунами высотой до 4 км, в районе столкновения султан раскаленного пара, воды и грунта со дна океана поднимается в стратосферу на высоту порядка 35 км. Начальное давление в основании развивающегося султана достигает десятков тысяч атмосфер, что вызывает возникновение ударной волны. Гигантские цунами могут проникать на сотни километров от океанского побережья в глубину континентов.

Фрагменты материала ударника и «мишени» (участка земного грунта) могут быть выброшены в окружающее пространство со скоростями в несколько километров в секунду за пределы и в пределах атмосферы, подвергнув бомбардировке огромную территорию. Мощная ударная волна и катастрофическое землетрясение вызывают грандиозные механические разрушения, а световой импульс от взрыва — пожары на территории в миллионы квадратных километров (вплоть до целого континента). Громадное количество мелкодисперсной пыли, значительно превышающее по массе вес самого импактора, должно быть вынесено в атмосферу. В результате, согласно расчетам, возникает глобальный эффект, совпадающий с эффектом «ядерной зимы», когда выброшенный в атмосферу аэрозоль (плотные пылевые облака) на многие месяцы прекращают доступ солнечных лучей к поверхности Земли. Это вызывает существенное ослабление освещенности и резкое похолодание в приземных слоях атмосферы на десять и более градусов. Этот эффект, который может быть назван «астероидной зимой», во многом аналогичен следствиям глобальной ядерной войны («ядерная зима»), параметры которой были рассчитаны в начале 1980-х гг. Астероидная зима вызывает почти полное прекращение процессов фотосинтеза и развития у зеленых растений. Животные, в свою очередь, должны гибнуть как от похолодания, так и бескормицы, их размножение подавляется из-за стресса.

За время астероидной зимы происходит накопление углекислого газа и водяного пара в атмосфере. После оседания пылевой компоненты, создаются условия для быстрого повышения температуры на несколько градусов из-за усиленного парникового эффекта. Такие резкие температурные колебания должны привести к гибели значительной части биосферы Земли.

Еще одним поражающим фактором мощного импакта является массовое образование оксидов азота в земной атмосфере из-за реакции между атмосферным азотом и кислородом под влиянием ударного сжатия воздуха за фронтом ударной волны. Последующая реакция с водой вызывает массивные кислотные дожди. Так, например, при падении Тунгусского космического тела (вероятно, фрагмента ледяного ядра кометы) в атмосфере могло образоваться, по некоторым оценкам, до 30 миллионов тонн оксида азота.

Кроме того, серные месторождения в районе Чиксулубского импакта привели к выносу в атмосферу огромного количества сернистых соединений, что привело к усилению сернокислотных дождей. Внесение в атмосферу новых химических соединений приводит, кроме того, к разрушению озонового слоя, что после очищения атмосферы от пыли должно вызвать поступление повышенных доз солнечного ультрафиолетового излучения к поверхности Земли, влияющих на биосферу. Суммарное воздействие всех перечисленных факторов, включая массовый стресс, понижающий репродуктивную способность теплокровных животных, могло привести к полному вымиранию всех наземных организмов с массой тела более 10 кг, исчезновению половины видов наземных существ и усилению мутагенных факторов, воздействующих на оставшиеся виды биоты (биотой принято называть все живое в данной области распространения).

В результате видно, что кажущееся «локальным» импактное событие (столкновение Земли с астероидом размером в несколько километров) на самом деле приводит к глобальным

последствиям. Палеонтологические исследования показывают, что в период *фанерозоя* (возраст менее 570 млн лет) на Земле происходили неоднократные массовые вымирания *биоты*, или *биотические кризисы*. В частности, в течение последних 250 миллионов лет выявлено, по крайней мере, 9 массовых вымираний живых организмов. Один из наиболее тяжелых биотических кризисов, который произошел на рубеже конца мезозоя (меловой период) — начала кайнозоя (третичный период), 65 млн лет назад, принято называть К/Т-событием (от термина Cretaceous-Tertiary boundary — граница мелового и третичного периодов). По разным оценкам, тогда вымерло от 30 до 90 % всех видов живых организмов, населявших Землю, включая полное (хотя и не мгновенное) исчезновение динозавров.

Исследователь кратера Чиксулуб Луис Альварес и его коллеги предположили, что К/Т-событие связано с падением астероида размерами порядка 10 км. Первоначальным свидетельством падения астероида явилось обнаружение в земной коре слоя с повышенным содержанием иридия, возраст которого совпал с возрастом К/Т-события (содержание иридия в каменных метеоритах типа хондритов почти на три порядка — в 785 раз — превышает его среднюю концентрацию содержания в земной коре).

Позднее был обнаружен кратер того же возраста. На сегодняшний день существуют серьезные основания считать, что причиной К/Т-события явилось падение астероида у берегов современной Мексики 64,98 млн лет назад, которое привело к образованию гигантского кратера Чиксулуб.

В конце эпохи эоцена 35 млн лет назад произошло массовое вымирание морских организмов и существенное похолодание климата. Выдвинуто и разрабатывается предположение о связи этого биотического кризиса с падением астероида, породившего Попигайскую котловину. Есть и гипотезы, связывающие и другие кризисы с падениями астероидов и кометных ядер.

Таким образом, современная парадигма позволяет связывать многочисленные кризисы в прошлом биосферы Земли с крупными импактными событиями. Расчеты и оценки показывают, что падение астероида с размерами до сотни метров может привести к *локальной катастрофе* (разрушением на территории в десятки — сотни квадратных километров). Падение астероида с размерами от нескольких сотен метров до полутора километров приводит к региональной катастрофе (в масштабах континента). Удар астероида размером более 1,5 км может привести к *глобальной катастрофе*, разрушающей всю инфраструктуру цивилизации и уничтожающей порядка половины населения земного шара. При этом долговременные климатические и экологические последствия импакта могут действовать на протяжении десятков лет, продолжая процессы уменьшения численности и деградации цивилизации. Понятно, что попадание астероида в объект технической инфраструктуры человечества (атомные электростанции, гидротехнические сооружения, газовые и нефтяные хранилища, крупные населенные пункты, пожароопасные и взрывоопасные объекты) может существенно увеличить ущерб, принесенный импактом.

Согласно современным оценкам, столкновения Земли с объектами, способными вызвать глобальную катастрофу, происходят в среднем один раз в 10 000 лет. Так, например, радарные наблюдения показали, что ранее неизвестный крупный кратер с возрастом порядка 14 000 лет залегает подо льдами Гренландии.

Эти оценки, разумеется (и к сожалению), не делают невероятным такой импакт в обозримом будущем.

Свидетельством тому, что проблема столкновения астероидов с планетами остается актуальной, является падение астероида 19 июля 2009 г. на Юпитер. Темный след падения в атмосфере планеты-гиганта случайно обнаружил астроном-любитель из Австралии Энтони Уэзли. Факт был подтвержден наблюдениями на крупных профессиональных

телескопах. Анализ состава выброшенных газов, а также цвета и динамики образовавшегося пятна позволяет предположить, что тело-импактор представляло собой небольшой каменный астероид. Ворвавшееся в атмосферу планеты тело нагрело ее нижние слои (стратосферу) на 3–4 градуса на большой площади. Согласно построенной модели, за астероидом сформировался след из перегретых газов. Каменистое тело взорвалось уже под облаками, при этом количество выделившейся энергии соответствовало энергии, которая выделилась бы при взрыве пяти гигатонн тротила. Огромное количество материала из нижних слоев атмосферы было выброшено вверх.

Современные средства астрономических наблюдений и мониторинга космического пространства, видимо, позволят уже в ближайшие годы обнаружить и отслеживать все существующие астероиды с размерами более 1 км, как минимум, из числа тех, которые сближаются с Землей. Как указано выше, на сегодняшний день небесные тела, реально угрожающие столкновением, среди подобных объектов не известны.

Если объекты километровых размеров, проходящие вблизи Земли, современными средствами астрономии обнаруживаются задолго (за многие месяцы и годы), то объекты меньших размеров (десятки метров и метры) открываются иногда за недели и даже за дни.

Рассмотрим относительно частые события, связанные с падениями небольших метеороидов (размером до 10 м). Очевидно, что такие столкновения могут, в крайнем случае, привести только к локальной (не к региональной) катастрофе.

Теория физических процессов, происходящих с небольшим астероидом, входящим в атмосферу Земли, на сегодняшний день разработана и в целом неплохо подкрепляется наблюдениями. Большой вклад в создание такой теории внесли отечественные специалисты из Института астрономии и Института динамики геосфер РАН.

Опуская математическое изложение теории, отметим следующее. Высокая скорость входа метеороида в атмосферу (не



менее второй космической, или 11,2 км/с), на практике, как правило, достигающая 15–20 км/с, приводит к значительным динамическим и температурным нагрузкам со стороны набегающего воздушного потока с соответствующей скоростью. Аэродинамическое напряжение в летящем теле возрастает от 100 атмосфер при скорости 20 км/с на высоте 30 км до 1000 атмосфер на высоте 15 км. Такое давление способно разрушить практически любое тело с размерами в первые метры. В большинстве случаев это приводит к лавинообразному разрушению (фрагментации) большинства каменных астероидов на высотах в десятки километров над поверхностью Земли. Астероид растрескивается, разваливается на фрагменты, которые в свою очередь также разрушаются на все более мелкие фракции.

Перед летящим в атмосфере телом (или облаком фрагментирующихся тел) формируется ударная волна. Атмосферный газ между передней поверхностью тела и фронтом ударной волны сильно сжимается и нагревается до температуры, превышающей 1500 °С, в результате чего поверхность тела интенсивно плавится и испаряется. Набегающий поток воздуха уносит с внешней поверхности тела расплавленный (в виде капель) либо твердый (в виде пылинок и мелких фрагментов) материал. Этот процесс называется *абляция* (разбрызгивание). В результате в атмосфере вдоль траектории падения формируется абляционный *дымно-пылевой след*, содержащий значительную часть вещества падающего астероида преимущественно в виде мелкодисперсной пыли, которая может оседать в течение многих часов и даже суток. Большая часть вещества сгорает в атмосфере. До поверхности Земли долетают лишь отдельные мелкие каменные фрагменты (если астероид каменный) с размерами от миллиметров до десятков сантиметров, а также частицы дымно-пылевого следа микронных размеров. Их падение эффективно тормозится атмосферой, и большого ущерба такие фрагменты принести не могут.

Таким образом, земная атмосфера является мощным защитным фактором, делающим столкновение с небольшими астероидами практически безопасным. Огромная кинетическая энергия падающего астероида тратится на световое излучение раскаленного вещества (около 9 %), а также на нагрев и динамические процессы при трении о воздух. Эта энергия сопоставима с энерговыделением во время взрыва тактического ядерного боеприпаса (эквивалентная мощность порядка нескольких тысяч тонн тротила). Однако энергия выделяется не мгновенно, а в течение нескольких секунд, за которые падающий астероид успевает пролететь десятки километров. В результате энерговыделение оказывается распределенным в пространстве и во времени, причем на высоте в десятки километров, что снижает воздействие на земную поверхность до практически безопасных значений.

Внешне процесс падения каменного астероида размерами в первые метры выглядит как появление на небе *болида* — яркого огненного шара, быстро летящего по небу, с угловыми размерами сопоставимыми с диском Луны (порядка  $0,5^\circ$ ). Лучше всего болид наблюдается в ночное время, однако яркий болид может быть виден и днем. Для болида характерен яркий «хвост» — след, остающийся за огненным шаром и представляющий собой участок нагретого и поэтому светящегося ионизованного воздуха, трассирующий траекторию полета падающего метеороида. Хвост болида может светиться, плавно угасая, на протяжении нескольких секунд (первых десятков секунд). Темный дымно-пылевой след, напоминающий инверсионный след от самолета, деформируемый ветром, может наблюдаться часами.

**Суданский болид.** Современные средства контроля околоземного космического пространства не позволяют заблаговременно обнаруживать и определять траекторию движения астероидов метровых размеров. До конца 2010 г. удалось лишь однажды за несколько десятков часов до столкновения с Землей обнаружить астероид 2008 TC<sub>3</sub> размером около

3 м. Он вошел в атмосферу 7 октября 2008 г. над пустынной областью на севере Судана. Болид был зарегистрирован на высоте 65,4 км. На высоте около 37 км объект взорвался, распавшись на мелкие фрагменты. Выделившаяся энергия (в модели абсолютно черного тела с температурой 6 000 °С) оценена в  $4 \cdot 10^{11}$  Дж, что эквивалентно взрыву около 100 т тротила. Спустя месяц в пустыне были найдены сотни осколков метеорита общей массой около 5 кг.



*Рис. 6. След Суданского болида в атмосфере. NASA*

**Витимский болид.** Примером хорошо исследованного падения каменного метеороида может служить так называемый Витимский болид (название предложено автором), наблюдавшийся в ночь на 25 сентября 2002 г. на северо-вос-

токе Иркутской области (Мамско-Чуйский и Бодайбинский районы, бассейн р. Витим). Яркий болид сопровождался акустическими эффектами и мощной воздушной волной, вызвавшей сотрясения на больших расстояниях. Болид был зарегистрирован спутником ВВС США. Яркое свечение было обнаружено на высоте около 62 км в точке с координатами  $57,91^\circ$  с. ш. и  $112,90^\circ$  в. д. Болид прослежен до высоты приблизительно 30 км, где его координаты были  $58,21^\circ$  с. ш. и  $113,46^\circ$  в. д. Реконструкция траектории падения по этим данным позволила оценить угол ее наклона к горизонту (примерно  $34^\circ$ ). Общая длина проекции траектории от точки обнаружения до точки вероятного падения (пересечения прямой траектории с землей) составила около 90 км. Координаты этой точки — около  $114,06^\circ$  в. д.,  $58,60^\circ$  с. ш. Согласно спутниковым данным, в видимом диапазоне пик интенсивности излучения болида равнялся  $2,4 \cdot 10^{11}$  Вт/стерад. Общая излученная энергия оценена в  $8,6 \cdot 10^{11}$  Дж, что соответствовало температуре черного тела 6 000 К и эквивалентно взрыву 200 т тротила. Согласно современной теории, на излучение уходит около 9 % кинетической энергии падающего метеороида, таким образом, общее энерговыделение Витимского болида оценено в 1013 Дж или 2,4 тыс. тонн тротила.

Хотя условия для наблюдений болида были крайне неблагоприятными (местное время около двух часов ночи, температура около нуля, дождь со снегом, нижняя кромка сплошной облачности вдоль трассы полета находилась на высотах 1100–1200 м, что соответствует высотам господствующих здесь горных вершин), жители районного центра Мама (около 45 км на северо-северо-запад от проекции трассы полета) отмечали яркий свет, заливший все небо и пробивавшийся сквозь облака. Освещение сравнивалось с дневным. Отдельные очевидцы говорили, что «было больно смотреть». Некоторые свидетели события в окрестностях Мамы видели летящий огненный шар с хвостом, от которого «сыпались искры» сквозь редкие просветы в облаках: большинство оче-

видцев указывают лишь на яркое («как днем») освещение. Световые эффекты наблюдались на большой территории с характерным размером во многие десятки километров, включая г. Бодайбо и населенные пункты к северу от него.

Спустя 2–3 минуты в район Мама пришла ударная волна. Сотрясались стены, звенела посуда. Громкий раскатистый удар сравнивался очевидцами с мощным взрывом. Сильный удар, сотрясение строений, дрожание стекол и т. д. наблюдались в радиусе не менее 30–50 км от трассы падения. Экспедиция Иркутского научного центра СО РАН и ИГУ с участием автора, работавшая весной 2003 г., обнаружила в снеговых покровах мелкодисперсное космогенное вещество, выпавшее из дымно-пылевого следа болида. Крупных фрагментов найти не удалось, что не говорит о том, что их не было. Общая масса Витимского метеороида оценена в 50 т (при скорости входа в атмосферу 20 км/с), 90 т (при скорости 17 км/с) или 30 т при скорости 25 км/с. Это соответствует размерам начального тела 2–3 м. Современная статистика показывает, что примерно раз в полтора года Земля сталкивается с астероидами размером порядка 2–3 м и с гораздо большим количеством более мелких небесных тел (метеороидами). Такие события редко происходят на глазах квалифицированных наблюдателей, поскольку большая часть поверхности Земли (океан, тайга, горы, пустыни, джунгли, приполярные районы) остается малонаселенной. Анализ найденных частиц показал, что это вещество типичного каменного астероида.

**Сихотэ-Алинский метеорит.** Как указано выше, железные астероиды сталкиваются с Землей гораздо реже (их меньше, чем каменных). В случае падения железного тела, возможно падение крупных фрагментов. Наиболее показательным является падение Сихотэ-Алинского метеорита 12 февраля 1947 г. в Хабаровском крае, в отрогах хребта Сихотэ-Алинь вблизи г. Дальнегорска. Болид был виден в радиусе 400 км, был слышен грохот и гул, пылевой след не рассеивался два часа. На месте падения обнаружено 24 кратера с диаметрами более 9 м,

самый крупный достигал 27 м в диаметре, а также множество воронок на площади в 3,5 кв.км. Найдено несколько тысяч обломков железоникелевого метеорита, разрушившегося еще в воздухе. Общая масса собранных обломков составила 27 т, самый крупный фрагмент весил 1745 кг. Предполагается, что астероид имел массу около 70 т и размер около 2,5 м, т. е. был близок по своим параметрам к Витимскому метеороиду. Разница заключается в составе: каменное Витимское тело было разрушено в атмосфере набегающим потоком воздуха до состояния мелкодисперсной пыли и, возможно, мелких (ненайденных) фрагментов, Сихотэ-Алинский метеорит, состоявший из никелистого железа, распался на фрагменты разных размеров, включая достаточно крупные. Несомненно, в случае падения на населенный пункт, метеорит мог явиться причиной значительного ущерба, включая человеческие жертвы. Поскольку еще в начале XXI в. продолжались поиски и обнаружение многочисленных обломков метеорита, есть основания полагать, что классические оценки массы и размеров Сихотэ-Алинского метеорита занижены.



*Рис. 7. Падение Сихотэ-Алинского метеорита  
(фрагмент картины очевидца события, художника П.И. Медведева)*

**Челябинский метеорит.** Крупнейшим событием из числа столкновений астероидов с Землей, наблюдавшихся за последние 100 лет после падения Тунгусского космического тела, является падение так называемого Челябинского метеорита. Утром 15 февраля 2013 г. над территорией России в атмосферу вошел каменный астероид из группы Аполлонов с характерным размером 17–19 м массой около 8 000–10 000 тонн со скоростью около 17 км/с под углом 14–16° к локальной поверхности Земли.

Падение наблюдалось в виде ослепительно яркого болида (очевидцы ощущали тепло мощного излучения на коже), возник мощный инверсионный след. В ходе движения в атмосфере небесное тело интенсивно разрушалось, яркость свечения немонотонно менялась. Наиболее значительные разрушения наблюдались на высоте 23 км, после чего яркость свечения существенно упала.



*Рис. 8. Яркий болид, завершившийся выпадением Челябинского метеоритного дождя. Изображение с автомобильного видеорежистратора*

На площади во многие десятки километров наблюдалось выпадение множественных фрагментов тела астероида в виде обширного метеоритного дождя. Большинство фрагментов имели размеры порядка одного сантиметра, найдены и более крупные осколки с размером порядка дециметра. Наиболее крупный фрагмент массой более 500 кг пробил лед озера Чебаркуль западнее Челябинска и упал на дно озера глубиной около 11 м. Этот фрагмент был поднят через полгода.

Через несколько минут после падения с большой высоты пришла сильная ударная волна, которая разрушила оконное остекление во многих зданиях Челябинска. Более 1 600 человек получили травмы от порезов разбитыми стеклами, к счастью, обошлось без жертв. Общая стоимость ущерба, принесенного ударной волной, оценивается в 1 млрд рублей. Энергия, выделившаяся в результате падения метеорита, оценена примерно в 0,5 Мт в тротиловом эквиваленте.

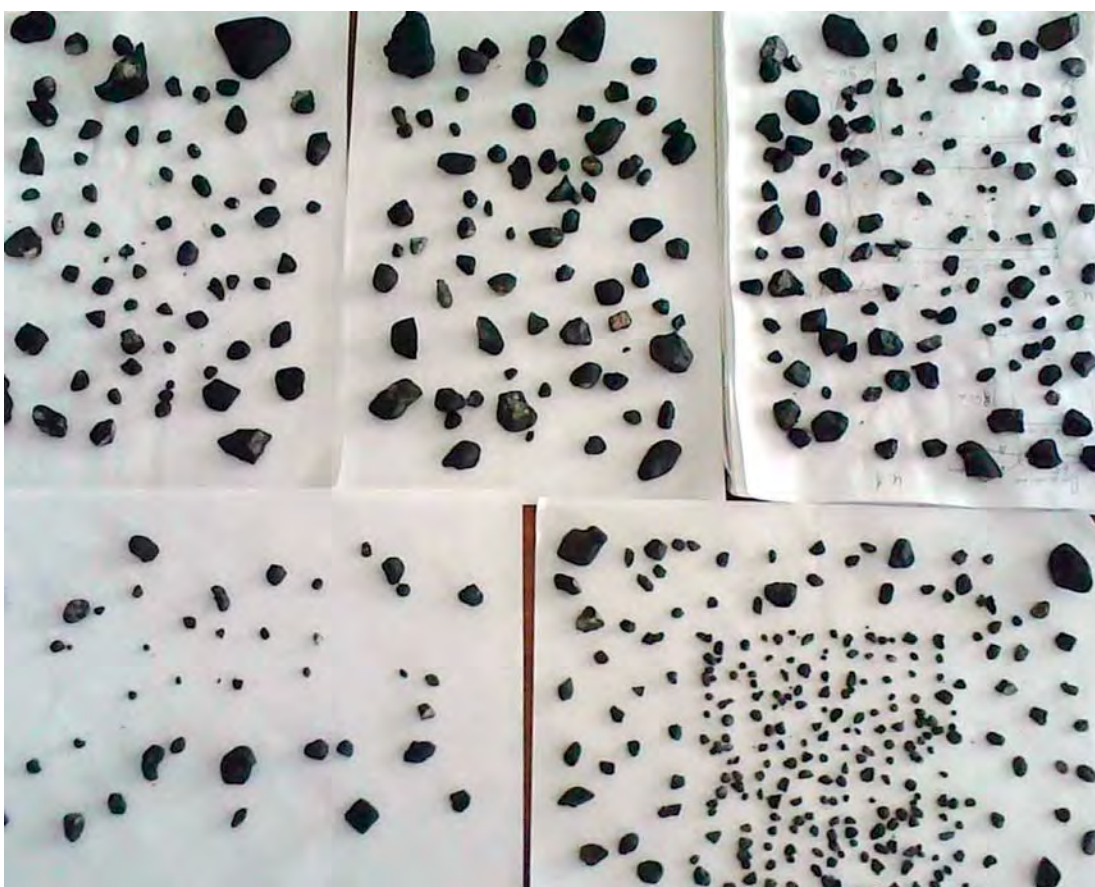
Поскольку падение метеорита была зафиксировано множеством автомобильных видеорегистраторов, а также спутниками с околоземной орбиты, удалось наиболее детально за всю историю проанализировать и изучить процесс падения. Так как астероид приближался к Земле со стороны Солнца (на дневном небе), он не был заблаговременно обнаружен на этапе подлета к Земле.

Таким образом, подавляющее большинство астероидов метровых размеров, с которыми Земля сталкивается регулярно (практически ежегодно) и дециметровых размеров (с которыми Земля сталкивается, по-видимому, примерно раз в столетие), в основном разрушаются при прохождении атмосферных слоев. Тем не менее, нередки случаи, когда сравнительно крупные фрагменты достигают поверхности, образуя воронки и кратеры. Например, вблизи хутора Царев в 1922 г. упал крупный каменный метеорит, обнаруженный только спустя полвека. В 1998 г. большой каменный метеорит упал среди дня в Туркменистане на хлопковом поле, где велись сельскохозяйственные работы. Случаев падений метеоритов меньших размеров в XX веке насчитывается несколько десятков. Очевидно, что в подавляющем





*Рис. 9. Инверсионный след от Челябинского метеорита*



*Рис. 10. Фрагменты Челябинского метеорита с характерным размером 1 см. Фото М. Карманова*



*Рис. 11. Полынья во льду озера Чебаркуль, пробитая крупным фрагментом Челябинского метеорита*



*Рис. 12. Фрагмент Челябинского метеорита, поднятый со дна озера Чебаркуль*

большинстве упавшие метеориты остаются ненайденными, падая в акватории Мирового океана либо малонаселенных местах, занимающих большую часть поверхности Земли. Тем не менее, по мере развития техносферы цивилизации, ее повреждения вследствие астероидной опасности становятся со временем все более вероятными.

## Кометная опасность

Понятию астероидной опасности посвящены предыдущие разделы настоящего пособия. В то же время, в литературе, посвященной этому вопросу, применяется термин «астероидно-кометная опасность», или АКО. Дело в том, что не только астероиды, но и ледяные ядра комет размером в несколько километров могут представлять опасность при возможных столкновениях с Землей. По некоторым оценкам, до 10% ударных кратеров на земной и лунной поверхности порождено столкновениями нашей планеты с кометными ядрами. По-видимому, наиболее интенсивные кометные бомбардировки наблюдались на ранней стадии формирования Земли. Некоторые варианты теории эволюции нашей планеты допускают, что вода на Землю была в основном привнесена именно кометами. Интенсивность проникновения кометных ядер во внутренние области Солнечной системы не является постоянной величиной.

Вполне правдоподобной является гипотеза о кометных ливнях, когда из-за гравитационного воздействия на облако Оорта (гипотетическое сферическое скопление кометных ядер, концентрически окружающее Солнце со всех сторон на расстоянии порядка 1 светового года от Солнца) со стороны проходящей близко соседней звезды, значительное количество кометных ядер может изменять параметры своих орбит и устремляться внутрь Солнечной системы. Не исключено, что подобные ливни неоднократно имели в место в прошлом.

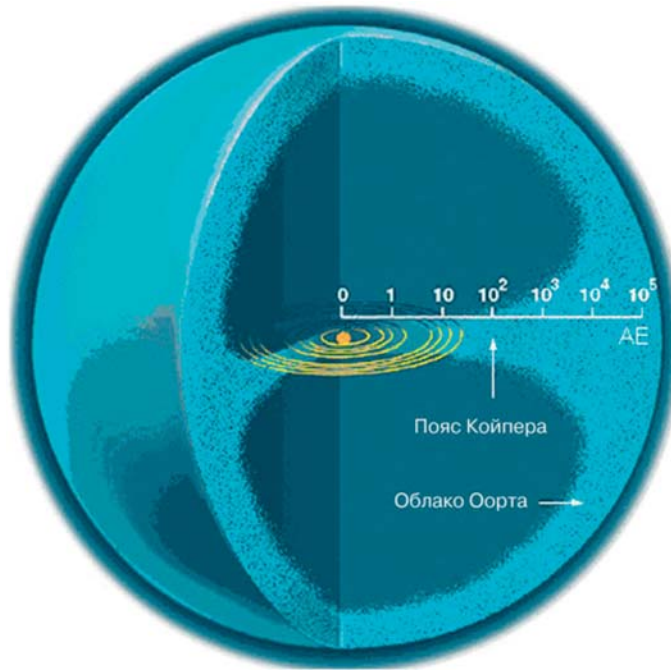


Рис. 13. Схема Солнечной системы. Справа показано облако Оорта

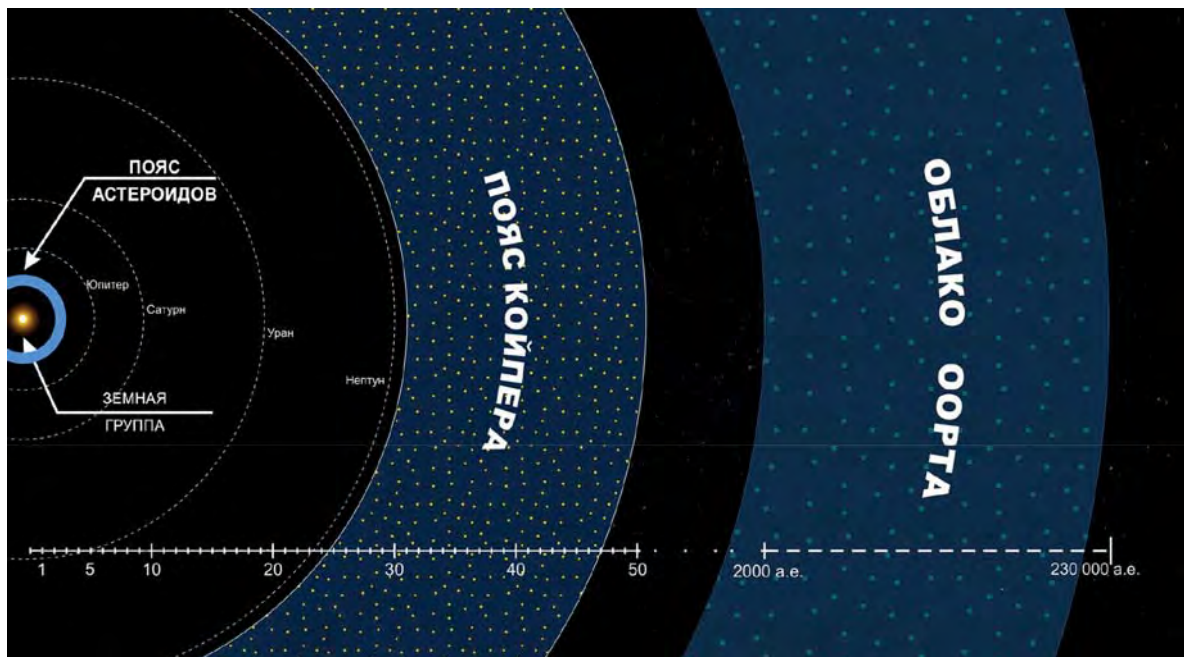


Рис. 14. Схема Солнечной системы. Справа показано облако Оорта

Поскольку наклоны орбит комет могут принимать значения от  $0$  до  $180^\circ$ , часть кометных ядер движется по отношению к Земле по встречным траекториям. Примером может служить комета Люлин, наблюдавшаяся в 2009 г. Это означает, что скорость столкновения может достигать  $72$  км/с, что многократно увеличивает разрушительные воздействия в случае импакта. Следует подчеркнуть, что при космических скоростях столкновений становится несущественным, из камня (в случае астероида) или льда (в случае кометного ядра) состоит тело-импактор.

**Тунгусское космическое тело.** Наиболее вероятным примером столкновения небольшого фрагмента ядра кометы с Землей является *Тунгусский феномен*. Явления, наблюдавшиеся 30 июня 1908 г. над северной Сибирью, расцениваются большинством исследователей как следствие вхождения в земную атмосферу со скоростью порядка  $20$  км/с фрагмента ледяного ядра кометы с характерным размером порядка нескольких десятков метров и массой порядка  $1$  млн тонн. Расчеты показывают, что ледяное ядро должно было взрывообразно испариться на высоте  $6-10$  км над поверхностью Земли, что было эквивалентно взрыву с мощностью  $8-15$  млн тонн тротила. Ранние оценки давали мощность взрыва до  $40$  млн тонн тротила.

В результате разрушения Тунгусского метеорного тела наблюдалось землетрясение, мощная ударная волна повалила лес на площади около  $2\ 200$  км<sup>2</sup>, вспышка вызвала грандиозный лесной пожар. Восстановленная по многим данным траектория тунгусского тела близка к траектории кометы Энке, с падением фрагмента которой, как правило, ассоциируют описываемый феномен. Надо заметить, что данная концепция, которая выглядит вполне убедительной и объясняет практически все известные факты, тем не менее, пока не считается окончательной и имеет статус наиболее вероятной рабочей гипотезы. Тщательные поиски фрагментов метеорита к успеху не привели. В рамках кометной ги-

потезы тунгусского феномена, ледяной фрагмент кометного ядра взрывообразно превратился в клуб водяного пара, при этом органические компоненты ядра сгорели и испарились, поэтому фрагменты тунгусского метеорита так и не были найдены.



*Рис. 15. Вывал леса в районе воздушного взрыва Тунгусского космического тела. Фото экспедиции Л.А. Кулика*

Еще одним наглядным примером столкновения кометы с планетой может служить падение фрагментов ядра кометы Шумейкеров-Леви-9 в период с 16 по 22 июля 1994 г. на Юпитер. Уже через 1 час 45 минут после падения фрагмента G (обозначенного, как и другие фрагменты, буквами английского алфавита) в атмосфере Юпитера образовалось темное пятно размерами около 9000 км (несколько меньше диаме-

тра Земли). Общее количество энергии, выделившееся при падении осколков кометы, соответствует  $10^5$ – $10^7$  мегатонн в тротиловом эквиваленте. Очевидно, что подобное столкновение с Землей уничтожило бы цивилизацию.

В списке близких (меньше 15 млн км от Земли) прохождений комет за последние 300 лет значится 21 событие. Ближе всего к Земле подходила комета Лексея в июле 1770 г. (2,25 млн км от Земли, или 6 радиусов орбиты Луны).

Тем не менее, кометная угроза выглядит менее значительной по сравнению с астероидной опасностью из-за меньшего (по сравнению с астероидами) количества короткопериодических комет, которые, к тому же, довольно быстро разрушаются, превращаясь в неопасные и малоопасные рои мелких метеороидов и пыли. Общее количество наблюдаемых комет, видимо, недооценивается за счет сложностей наблюдений объектов,двигающихся со стороны Солнца.

Наиболее известная из комет — комета Галлея — проходила в 1910 г. в 22 млн км от Земли, при этом наша планета пролетела сквозь газопылевой хвост кометы. Это событие ожидалось обывателями с большой тревогой. Однако



*Рис. 16. Фрагменты кометы Шумейкеров-Леви-9, приближающиеся к Юпитеру (космический телескоп «Hubble», 1994 г.)*

плотность вещества в хвосте кометы ничтожна, поэтому прохождение Земли сквозь кометный хвост не вызвало никаких последствий. Поэтому в рамках проблемы кометной опасности следует рассматривать только оценку вероятности возможных столкновений с ядрами комет. Кометные хвосты опасности для нас не представляют.

## Средства борьбы с астероидной опасностью

Проблема предотвращения астероидной опасности может быть разделена на две составляющие. Первая — это непрерывный эффективный мониторинг дальнего и ближнего космического пространства, который мог бы обеспечить гарантированное заблаговременное обнаружение объектов, проходящих через околоземное пространство, в том числе, угрожающих Земле. Вторая составляющая — создание средств разрушения либо отклонения угрожающих Земле объектов задолго до сближения с нашей планетой.

Проблема заключается в том, что подавляющее большинство наземных телескопов обладает чрезвычайно малым полем зрения, в результате чего вероятность обнаружить ранее неизвестный астероид крайне мала, поскольку для обзора полного неба требуется непомерно много времени.

В настоящее время эта задача решается с помощью новой техники. Во-первых, введена в строй система из четырех телескопов Pan-STARRS с зеркалами диаметром по 1.8 м на вершине Мауна-Кеа на одном из островов Гавайского архипелага (США), которые должны обеспечить регулярный осмотр примерно  $\frac{3}{4}$  всего неба трижды в месяц.

Во-вторых, в Чили, как уже указано выше, ведется сооружение большого синоптического обзорного телескопа LSST имени Веры Рубин (США) с большим полем зрения диаме-



тром  $3.5^\circ$ . Диаметр главного зеркала телескопа — 8.36 м. Это позволит за три ночи осматривать небо с высокой проникающей силой, а значит оперативно обнаруживать даже очень слабые объекты на больших расстояниях от Земли. Ожидается, что «первый свет» этот телескоп увидит в 2022–2023 г.



*Рис. 17. Комплекс телескопа LSST имени Веры Рубин, предназначенного для наблюдений в интересах решения проблемы кометно-астероидной опасности (рисунок НАСА)*

Следует упомянуть также российский широкоугольный телескоп (диаметр поля зрения  $2.7^\circ$ ) АЗТ-3ЗВМ с диаметром зеркала 1,7 м, установленный в Саянской обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН на границе с Монголией. Он введен в строй в 2016 г.

Эта и другая техника существенно повышает возможности астрономов по обнаружению объектов, угрожающих Земле. Однако с помощью наземной техники вся проблема решена быть не может: примером может служить Челябинское космическое тело, приближавшееся к Земле по дневному небу со стороны Солнца, и следовательно, его не мог обнаружить ни один наземный телескоп. Для обзора солнечного сектора



*Рис. 18. Башня телескопа АЗТ-33ВМ Института солнечно-земной физики СО РАН (фото С.А. Язева)*



*Рис. 19. Вход в атмосферу европейского беспилотного грузового транспортного космического корабля ATV «Жюль Верн» сопровождался появлением яркого болида. Космический корабль разрушился и сгорел в атмосфере, подобно небольшому астероиду*

неба необходима аппаратура на борту космического аппарата. В России разрабатывается проект СОДА (система обнаружения дневных астероидов), предусматривающий размещение космического аппарата, оснащенного небольшим телескопом, в точке Лагранжа L1 на линии между Солнцем и Землей. Однако этот проект не предусмотрен Федеральной космической программой РФ и его перспективы пока неясны. Неизвестны и аналогичные зарубежные проекты.

Обнаружение тела, угрожающего Земле, в принципе позволяет обеспечить, в случае необходимости, эвакуацию людей и подготовку инфраструктуры для минимизации ущерба от падения космического тела. Что касается второй составляющей проблемы — возможностей разрушить или отклонить потенциальный импактор — то на сегодня такие системы не созданы, хотя есть целый ряд идей по этому поводу.

В 2021 г. в США осуществлен запуск космического аппарата DART, который должен осуществить первый в истории человечества «таран» — столкновение с астероидом из класса «аполлонов». Речь идет о двойном астероиде Дидим (размер — 800 м) и обращающемся вокруг него спутнике Диморф размером 170 м. Запланирован удар космического аппарата по Диморфу в сентябре 2022 г. В программе проекта — точнейшие измерения параметров орбиты Диморфа до и после удара с целью оценить, приведет ли столкновение к изменению орбиты астероида, т.е. оценить, насколько эффективным может оказаться такой способ изменения траектории движения астероида.

Таким образом, проблема потенциальной астероидной опасности остается в значительной степени нерешенной. Если современные телескопы, включая автоматизированные системы, а также крупные установки класса телескопа Веры Рубин, с высокой эффективностью способны заранее (за годы и месяцы) обнаруживать крупные угрожающие Земле объекты, то средства борьбы с такими объектами пока не разработаны. Остается надежда на то, что крупный импак-

тор будет действительно обнаружен за годы, и человечество успеет подготовиться и парировать угрозу, а малые тела не представляют серьезной опасности (в худшем случае — локальная катастрофа).

## Контрольные вопросы

1. Опишите возможные последствия падения на Землю крупного астероида.
2. Назовите примеры крупных астроблем на Земле. Почему их существенно меньше, чем на соседнем небесном теле — Луне?
3. Изложите типичный сценарий столкновения метеороида с размерами порядка 3–5 м с Землей.
4. Оцените степень опасности последствий для земной цивилизации столкновений с Землей железных метеороидов с размерами порядка 10 м на примере Сихотэ-Алинского метеорита (считается, что такие столкновения происходят в среднем один раз в 100 лет).
5. Почему Челябинское космическое тело не было замечено заранее, до его приближения к Земле?
6. Что нужно сделать, чтобы заранее фиксировать приближение небесных тел, подобных Челябинскому?
7. Что такое метеорит?
8. Может ли атмосфера предотвратить падение на Землю астероида с размерами более 100 м? Обоснуйте ответ.
9. Почему кометная опасность считается менее высокой, чем астероидная?
10. Какова базовая теория, объясняющая Тунгусский феномен?
11. Каковы возможности телескопа имени Веры Рубин?
12. Расскажите о проекте DART.

# СОЛНЦЕ И ЖИЗНЬ ЗЕМЛИ

**С.А. Язев,**

*доктор физико-математических наук,  
Иркутский государственный университет,  
заместитель сопредседателя Международной общественной  
организации «Астрономическое Общество»*

## Основная информация о Солнце и солнечно-земных связях

*(в помощь учителю и лектору планетария)*

### Что такое Солнце?

Солнце — звезда, которую относят к типу желтых карликов спектрального класса G2V. Масса Солнца —  $2 \times 10^{30}$  кг, что составляет 330 000 масс Земли и превышает 99% массы всей Солнечной системы, включающей все планеты Солнечной системы, их спутники, астероиды и метеороиды, объекты пояса Койпера, кометы, пыль и газ. 74% массы Солнца приходится на водород, 24% массы — на гелий. На Солнце присутствуют ядра атомов и всех прочих стабильных химических элементов, но их общая доля не превышает 2% массы Солнца. Вещество, из которого состоит Солнце, находится в газообразном состоянии, но этот газ ионизован из-за высокой температуры: на



видимой поверхности Солнца, ниже которой оно становится непрозрачным, температура достигает 6000 К. Теоретические модели дают оценку температуры в центре Солнца порядка 15 млн К. Благодаря своей высокой температуре Солнце испускает окружающее пространство огромное количество энергии в виде электромагнитного излучения. Суммарная мощность этого излучения (светимость Солнца) составляет  $4 \cdot 10^{26}$  Вт. Солнце вращается вокруг своей оси, совершает один оборот за 25,38 земных суток (сидерический период). Поскольку Земля движется по орбите вокруг Солнца в том же направлении, для земного наблюдателя Солнце совершает один оборот в среднем за 27,2753 земных суток. Этот период характерен для глубинных слоев Солнца, внешние слои отличаются дифференциальностью вращения — скорость вращения на экваторе больше, чем на высоких широтах вблизи полюсов.

## Почему Солнце светит?

Этот вопрос интересовал людей всегда, но разобраться в этом удалось только сравнительно недавно.

Английский физик **Юлиус Майер** в XIX веке предполагал, что Солнце разогрето падениями метеоритов, но оказалось, что этот фактор не может объяснить высокую температуру Солнца — в Солнечной системе нет такого количества небесных тел, которые, сталкиваясь с центральной звездой, могли бы настолько нагреть ее.



*Рис. 1. Юлиус Роберт Майер,  
1814–1878*

Немецкий естествоиспытатель **Генрих Гельмгольц** допускал, что под воздействием сильной гравитации Солнце постепенно сжимается и при этом в его недрах выделяется тепло. Однако выяснилось, что этот процесс завершился бы за несколько миллионов лет, тогда как данные геологии и

исследования метеоритов показывают, что и Земля, и вся Солнечная система, включая Солнце, существуют в тысячу раз дольше – несколько миллиардов лет (на сегодня возраст Солнца оценивается примерно в 5 миллиардов лет). Очевидно, что Солнце не может быть моложе Земли и астероидов.



*Рис. 2. Генрих Людвиг Гельмгольц,  
1821–1894*

Английский астрофизик **Джеймс Джинс** после открытия явления радиоактивности предположил, что Солнце разогревается радиацией большого количества ядер радиоактивных атомов. Однако спектральные методы показывают, что таких ядер на Солнце явно недостаточно.

Были и другие гипотезы. В конце тридцатых годов XX века немецкий физик **Ганс Бете**, работавший в США, создал теорию ядерного синтеза, которая оказалась правильной. В рамках этой теории, под влиянием очень высокой температуры в недрах Солнца (15 млн К), а также очень высокого давления (порядка  $3 \cdot 10^{16}$  Па) запускаются реакции ядерного синтеза (термоядерные реакции). В ходе таких реакций ядра атомов водорода





*Рис. 3. Джеймс Хопвуд Джинс,  
1877–1946*



*Рис. 4. Ганс Альбрехт Бете,  
1906–2005*

(протоны), взаимодействуя друг с другом, образуют ядра атомов гелия. Поскольку суммарная масса гелия оказывается немного меньше массы протонов, вступающих в реакцию, дефицит массы восполняется рождающимся в ходе реакции электромагнитным

излучением. Это излучение (энергичные фотоны гамма-излучения) и являются причиной того, почему Солнце светит вот уже 5 миллиардов лет. Пока хватает водородного топлива (а водорода на Солнце хватит еще на 5 миллиардов лет), термоядерный реактор в центре Солнца будет продолжать работать, превращая водород в гелий и выделяя электромагнитную энергию. Выяснилось, что в ядре Солнца есть и другие типы термоядерных реакций, порождающих излучение.

## Как энергия из ядра Солнца попадает наружу?

Гамма-фотоны не могут сразу вылететь из недр Солнца: они окружены веществом, плотно сжатым благодаря огромной гравитации, — плотность раскаленной плазмы в центре Солнца достигает  $150 \text{ г/см}^3$ . Фотон тут же поглощается находящейся рядом частицей, эта частица, получив дополнительную энергию, сама излучает новый фотон, на этот раз чуть меньшей энергии. Направление движения переизлученного фотона может оказаться любым — и вверх, и в стороны, и снова вниз. Поэтому в результате громадного количества таких переизлучений проходят сотни тысяч лет, пока потомок фотона, родившегося однажды в центре Солнца, преодолеет всю толщу Солнца (радиус Солнца составляет 700 000 км). Наконец, очередной фотон, попав в поверхностный слой, который становится прозрачным для излучения, беспрепятственно покинет Солнце и улетит в межпланетное пространство. Поскольку в ходе бесчисленных поглощений и переизлучения энергия фотона терялась, с поверхности Солнца уходят в космос фотоны уже не гамма-излучения, а менее энергичных диапазонов спектра — больше всего фотонов видимого, а также инфракрасного диапазонов. Излучает Солнце, кроме того, и в ультрафиолетовом, и в радио-диапазонах.

## Как устроено Солнце внутри?

Внутренне строение Солнца, согласно современной теории, выглядит следующим образом. Внутри находится самая плотная и самая горячая часть — ядро, где протекают термоядерные реакции. Ядро лежит в пределах от центра до примерно 0,3 радиуса звезды.

Над ядром находится зона лучистого, или радиативного, переноса. Ее температура и плотность ниже, чем в ядре (хотя по-прежнему очень высоки), поэтому термоядерных реакций здесь уже нет. Через эту зону излучение, поглощаясь и переизлучаясь, постепенно просачивается вверх, к поверхности Солнца.

На расстоянии примерно 0,7 радиуса от центра начинается конвективная зона. На этой глубине включается конвекция: тепло, поступающее снизу, заставляет потоки водородно-ге-

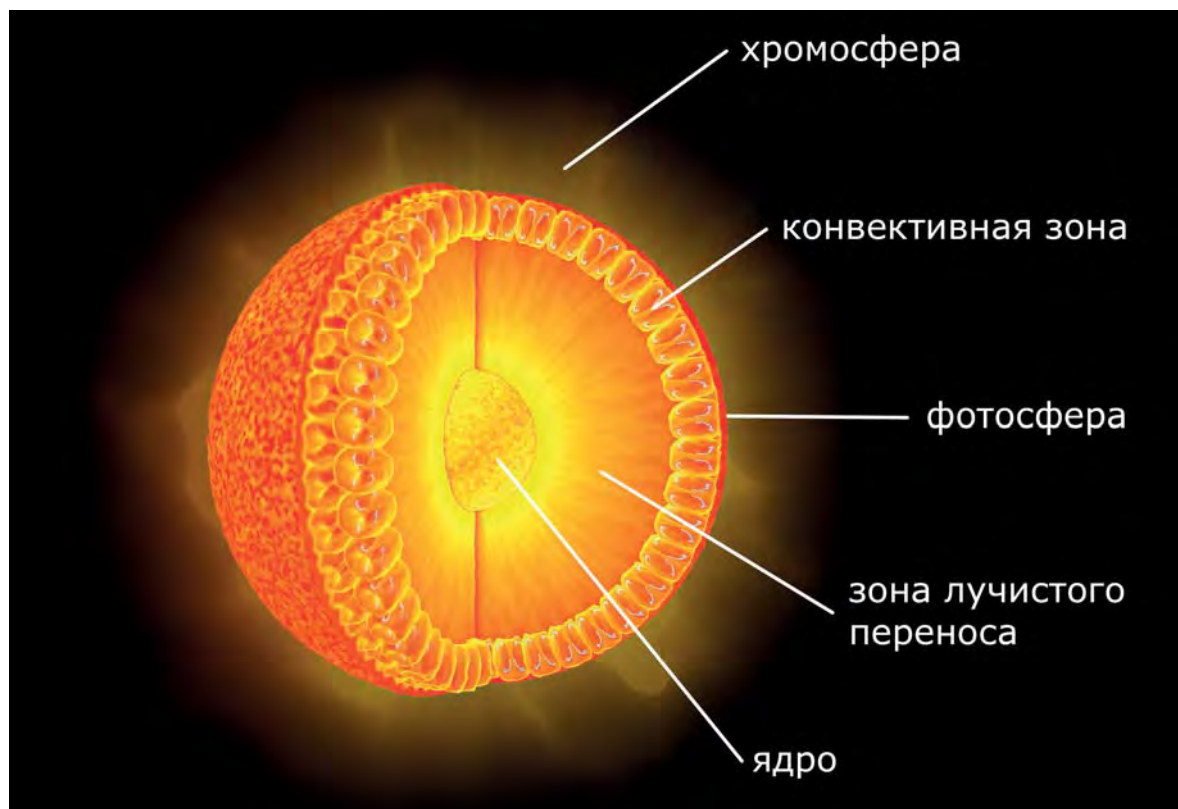


Рис. 5. Строение Солнца

лиевой плазмы разогреваться, расширяться и всплывать к поверхности. Здесь плазма остывает, отдавая свою энергию излучению, уходящему в космос, и охлаждаясь, опускается обратно в недра конвективной зоны. Возникают конвективные ячейки, в которых совершается постоянный круговорот: горячее вещество всплывает к поверхности Солнца, остывает и опускается вниз, где снова нагревается и поднимается. Этот процесс похож на кипение воды в чайнике, или на варку каши в кастрюле — в обоих случаях тепло поступает снизу, от нагретой плиты, подобно тому, как слой плазмы в конвективной зоне подогревается излучением снизу, от ядра Солнца.

Верхний слой конвективных ячеек достигает уровня, когда плазма становится прозрачной. Это первый слой, который мы можем наблюдать непосредственно, именно с этого уровня фотоны беспрепятственно уходят в окружающее пространство и могут достичь земного наблюдателя. Верхний слой конвективной зоны, с которого уходит излучение, называется фотосферой. Мы видим этой слой как яркую, сияющую поверхность Солнца. При наблюдениях в телескоп на фотосфере можно увидеть верхние части конвективных ячеек — так называемые гранулы, а вся картина видимой солнечной поверхности называется грануляцией.

Правильность наших представлений об устройстве Солнца подтверждается, во-первых, данными «гелиосейсмологии» — анализом колебаний солнечной поверхности, которые порождаются волнами, распространяющимися внутри Солнца. Подобно сейсмологии на Земле, когда анализ сейсмических волн в земной коре позволяет определять внутреннюю структуру Земли, выделяя кору, слои мантии и слоя ядра, гелиосейсмология обеспечивает нас данными о внутреннем строении Солнца и подтверждает существование описанных выше слоев внутри нашей звезды.

Во-вторых, современные нейтринные телескопы эффективно регистрируют солнечные нейтрино — легкие, электрически нейтральные частицы, рождающиеся в ядре Солнца во время

термоядерных реакций и свободно проходящие сквозь все слои Солнца. Свойства и количество регистрируемых солнечных нейтрино совпадают с прогнозом и демонстрирует, что описанная теория верна.

В-третьих, параметры Солнца на его поверхности, предсказанные теорией, хорошо соответствует наблюдаемым данным.

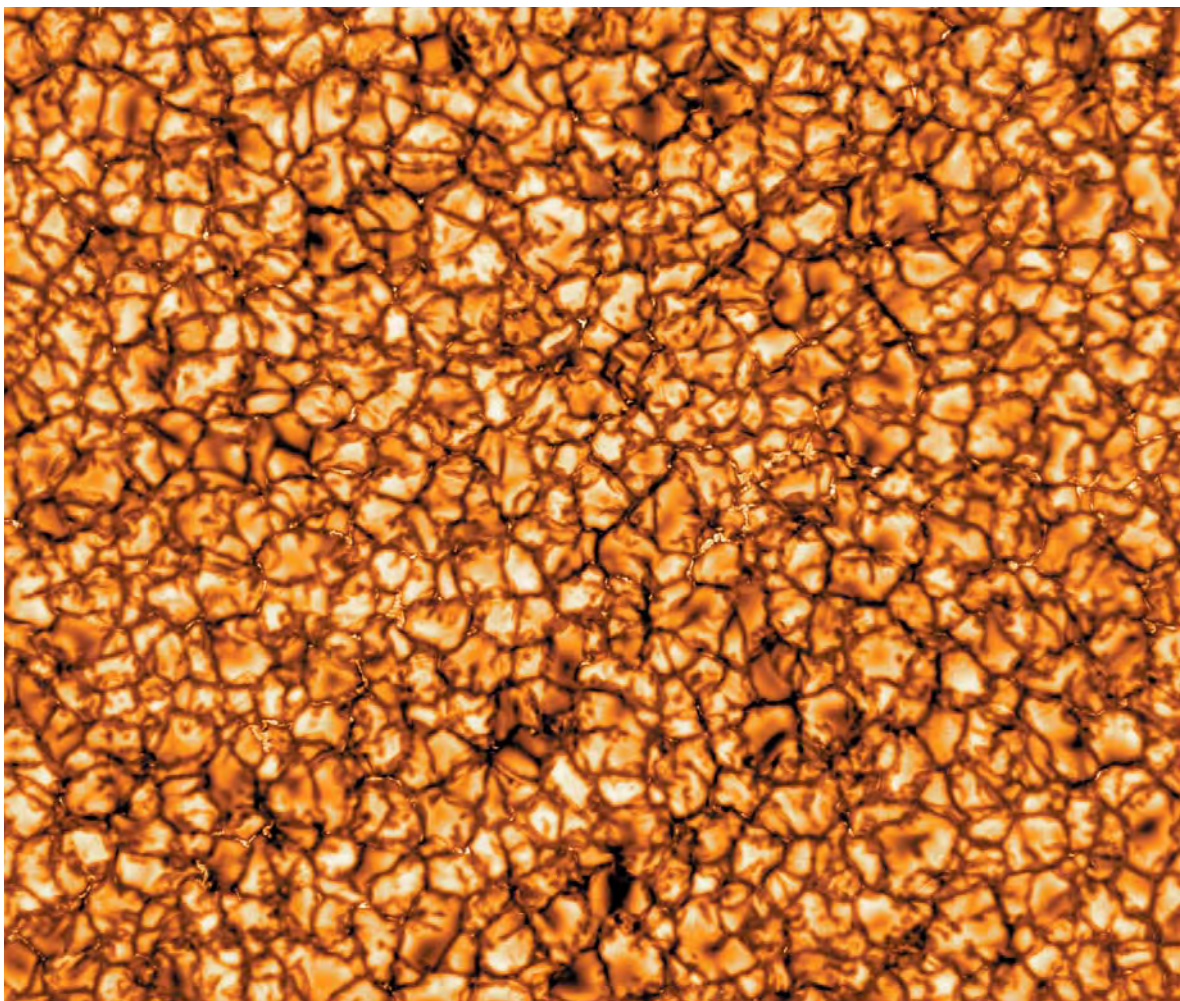
Наконец, в четвертых — теория термоядерного синтеза проверена на практике, когда с ее помощью была разработана водородная бомба. Эти испытания показали, что при определенных условиях, которые реализованы в недрах Солнца, действительно происходят термоядерные реакции.

## Как устроена атмосфера Солнца?

Условно считается, что огромная непрозрачная масса ионизованного газа, из которого состоит Солнце — это само Солнце, а прозрачный для электромагнитного излучения газ, окружающий Солнце — это солнечная атмосфера.

Слой, где плазма испытывает переход от прозрачного состояния до полной непрозрачности, имеет толщину 400 км — это всего 6 сотых процента радиуса Солнца, т.е. очень тонкий слой. Именно поэтому Солнце на небе кажется очень резко очерченным — 400 км с расстояния почти 150 млн км (среднее расстояние от Солнца до Земли) соответствует мизерному углу примерно в половину угловой секунды. Этот слой условно принимается за поверхность Солнца и называется фотосферой. Считается, что фотосфера — нижний слой солнечной атмосферы.

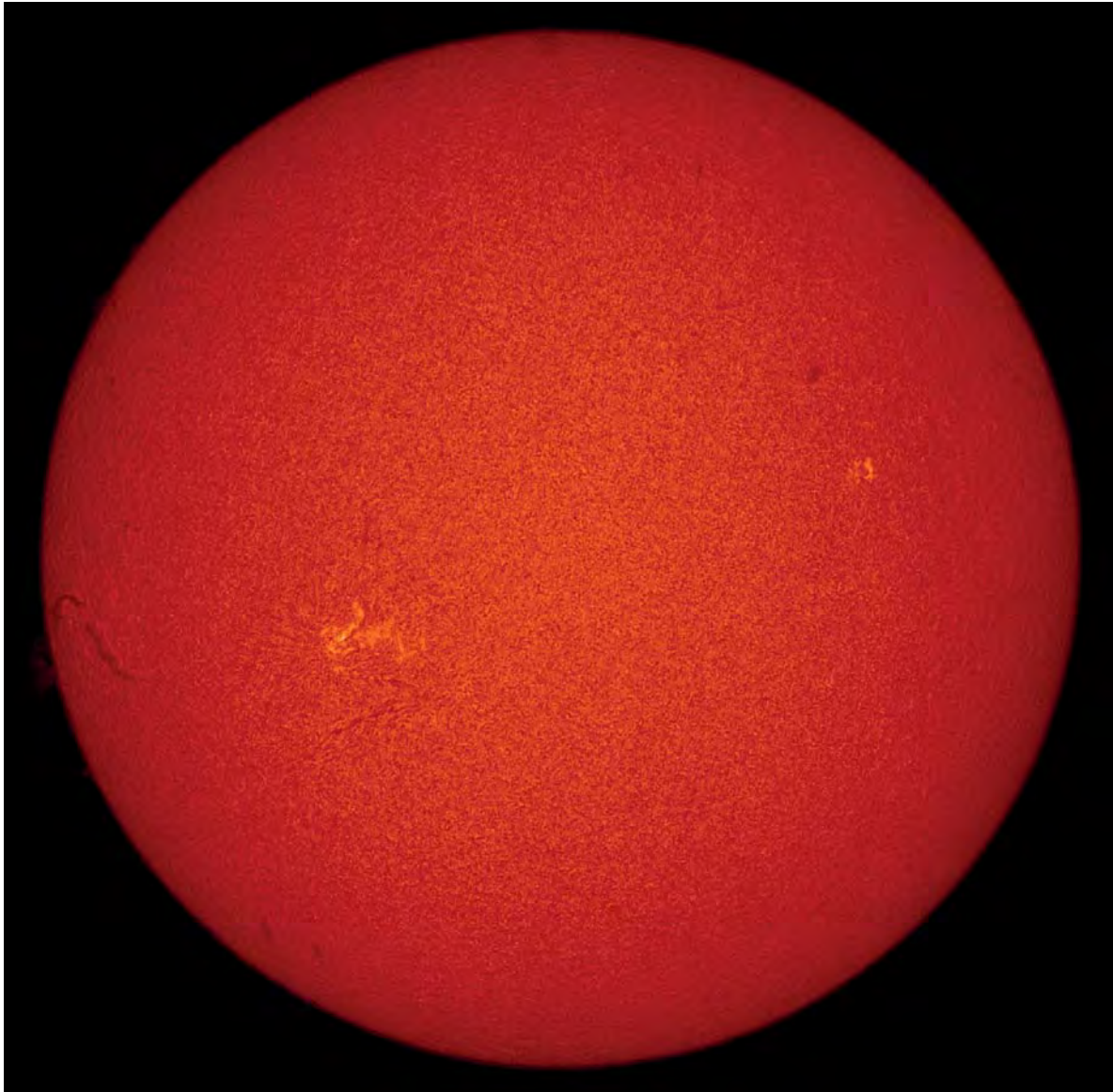
**Фотосфера** Солнца отличается самой низкой температурой на Солнце — начиная от этого уровня, температура растет и при перемещении вниз (вглубь Солнца), и при перемещении вверх. Температура фотосферы близка к 6000 градусов. Выше уже указано, что для фотосферы характерна картина грануляции,



*Рис. 6. Солнечная грануляция. Снимок получен с помощью солнечного телескопа имени Дэниэля К. Иноуи (DKIST), обсерватория Халеакала на острове Мауи, Гавайские острова, США*

которая хорошо видна в телескопы с высоким разрешением. Каждая гранула имеет типичные размеры около 1000 км и существует в среднем около 8 минут, после чего разрушается и на ее месте возникают новые гранулы.

**Хромосфера.** Примерно на 12–14 тысяч километров выше уровня фотосферы простирается еще один слой солнечной атмосферы — хромосфера. Хромосферу можно увидеть во время полного солнечного затмения (когда Луна перекрывает яркий свет фотосферы) как тонкую малинового цвета полосу на краю Солнца, либо с помощью специального телескопа-ко-



*Рис. 7. Солнечная хромосфера в свете линии водорода Н-альфа.  
Снимок обсерватории Канцельхёх, Австрия*

ронографа. Плотность водородно-гелиевой плазмы в хромосфере ниже, чем в фотосфере (плотность падает с высотой), а температура выше. В настоящее время хромосферу наблюдают с помощью специальных фильтров, пропускающих красный свет в линии излучения водорода Н-альфа на длине волны 656,3 нм. Для таких наблюдений используются, например, любительские солнечные телескопы «Коронадо», оснащенные такими фильтрами.

**Корона.** Выше хромосферы находится внешний слой солнечной атмосферы — корона. Здесь плотность вещества такая же, как в условиях самого высокого лабораторного вакуума на Земле — порядка  $10^8$ – $10^{10}$  частиц в кубическом сантиметре, но температура существенно выше — вплоть до 1–1.5 млн К (т.е. сравнительно редкие частицы движутся очень быстро). Протяженность короны огромна — много радиусов Солнца. Указать, где заканчивается корона, трудно — плотность плазмы асимптотически падает по мере удаления от Солнца, но так и не уменьшается до нуля в пределах внутренней части Солнечной системы. В определенном смысле можно сказать, что Земля находится внутри солнечной короны. Корону можно увидеть во время полного солнечного затмения, когда Солнце загораживается Луной, и мы видим на фоне потемневшего неба, как яркий свет фотосферы рассеивается на частицах короны — подобно тому, как мы видим дым, освещенный лучом фонарика в темноте.



*Рис. 8. Солнечная корона во время полного затмения Солнца, 2006 г.  
Снимок экспедиции Института солнечно-земной физики СО РАН,  
обсерватория на пике Терскол*

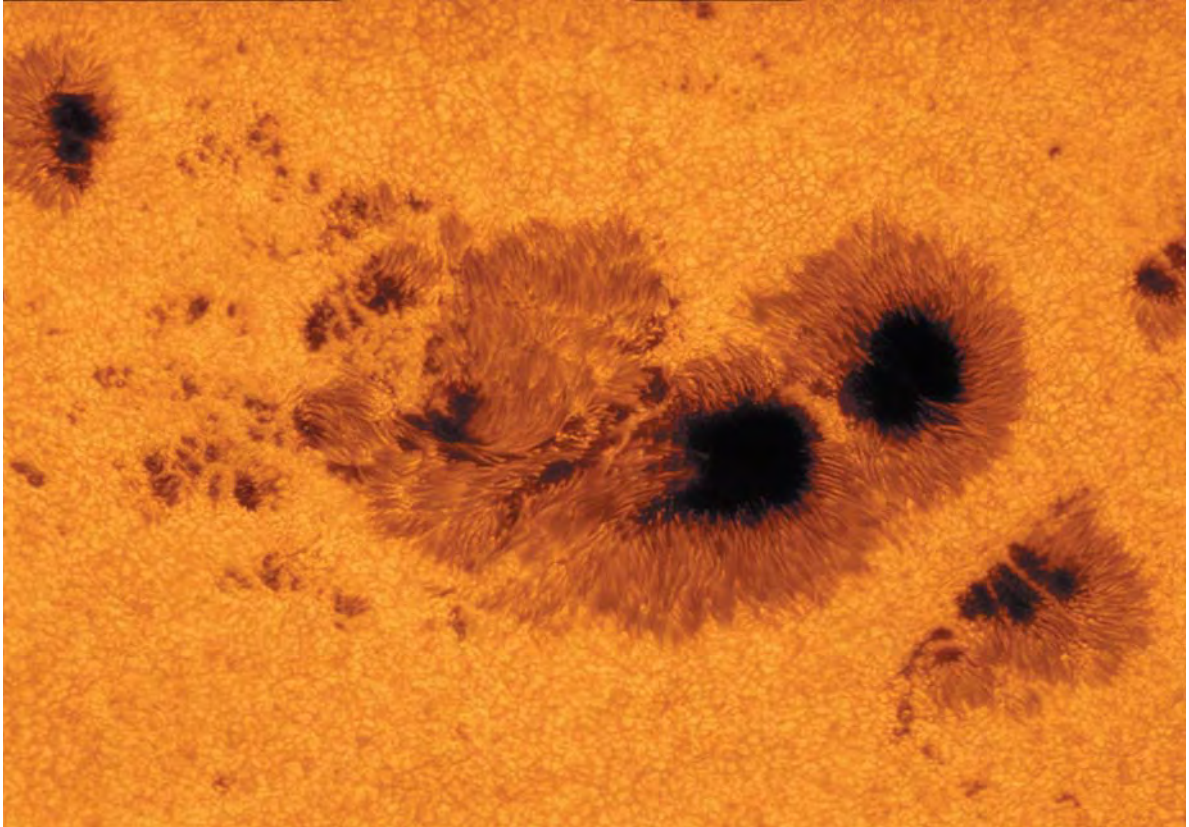


Частицы (в основном ядра атомов водорода и гелия, а также редкие ядра других элементов), приобретающие в короне высокие скорости, навсегда уходят от Солнца. Этот расходящийся во все стороны от Солнца поток частиц со скоростью 300–400 км/с называется «солнечный ветер».

## Что такое солнечная активность?

На Солнце происходят разнообразные процессы. Еще в древности, глядя на Солнце сквозь дым или дымку как через фильтр, люди иногда видели темные пятна на солнечном диске. Пятна появлялись и через несколько дней исчезали. Изобретение Галилеем телескопа в начале XVII века позволило начать регулярные наблюдения изменений на диске Солнца, которые получили название «солнечная активность». Самым заметным проявлением солнечной активности являются солнечные пятна. На сегодняшний день известно, помимо пятен, множество других типов структур и явлений в солнечной атмосфере, которые возникают, изменяются и исчезают. К проявлениям солнечной активности относятся солнечные пятна, факелы, протуберанцы, вспышки, выбросы коронального вещества, корональные дыры и другие.

**Солнечные пятна.** Солнечные пятна выглядят как темные (по сравнению с окружающей их фотосферой) образования, возникающие, увеличивающиеся в размерах (иногда размеры солнечного пятна кратно превышают размеры Земли), затем уменьшающиеся и исчезающие. Продолжительность существования пятен бывает разной — от нескольких часов до одного — двух месяцев, чаще всего — нескольких дней. Как правило, пятна появляются не по одному, а группами. В группе пятен бывает до нескольких десятков пятен разных размеров. В начале XX века американскому астрофизику **Джорджу Хейлу** удалось обнаружить, что в солнечных пятнах присут-



*Рис. 9. Крупная группа солнечных пятен на фоне грануляции.  
Снимок Алана Фридмана*



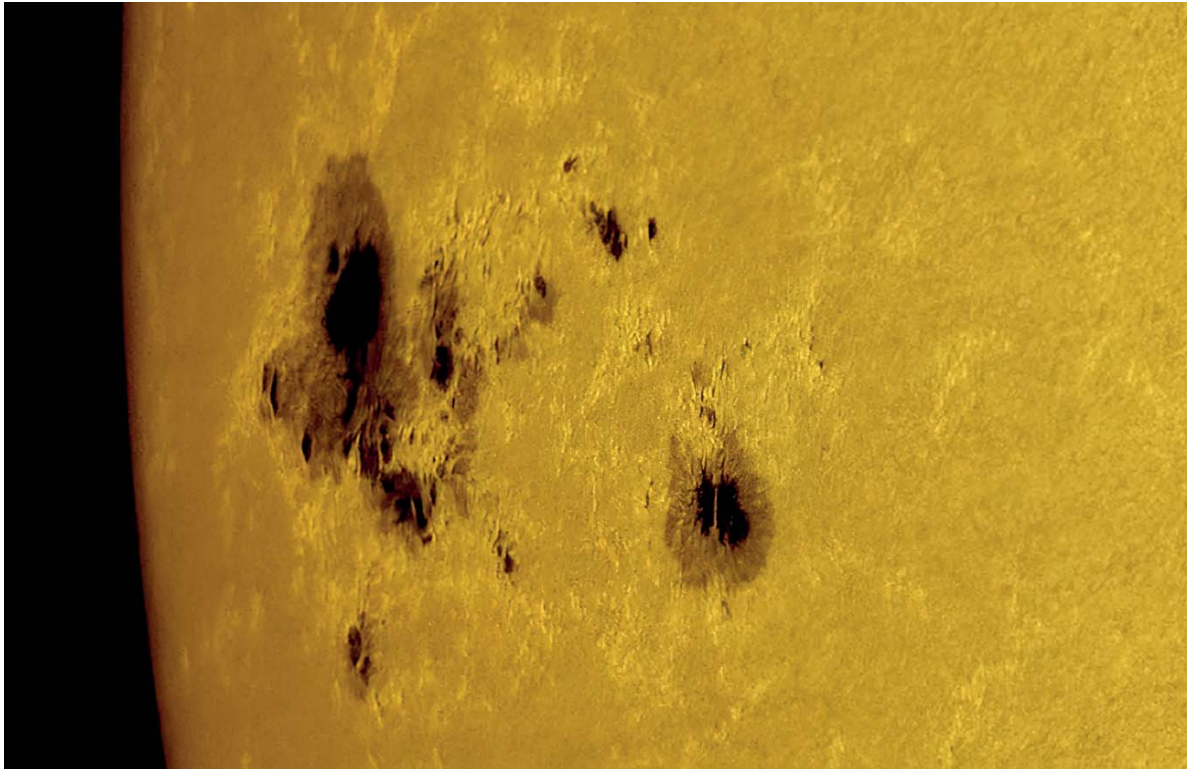
*Рис. 10. Джеймс Эллери Хейл,  
1868–1938*



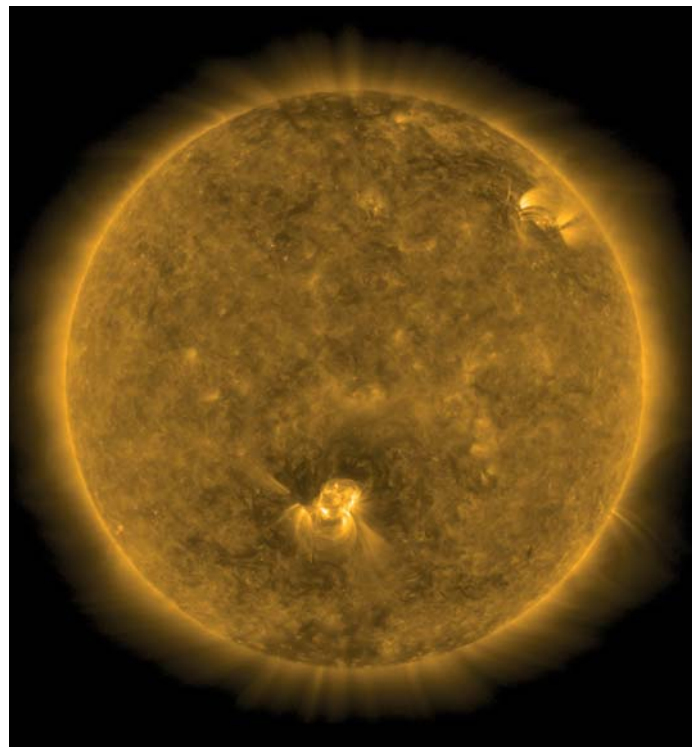
*Рис. 11. Солнечный телескоп обсерватории Маунт-Вилсон, США.  
Здесь была открыта магнитная природа солнечных пятен*

ствуют сильные магнитные поля (индукция магнитного поля от 1000 до 3000 Гаусс). Локальное магнитное поле подавляет конвекцию, меняет ее структуру в пятне, в итоге здесь понижается температура, из-за чего пятно выглядит более темным по сравнению с фотосферой.

**Факелы.** Вокруг групп солнечных пятен, как правило, располагаются обширные области, где гранулы выглядят более яркими, чем в «спокойной» фотосфере. Эти яркие образования получили название факелы. В факелах присутствует магнитное поле, но не такое сильное, как в пятнах – как правило, несколько сотен Гаусс, не больше тысячи. Наблюдения хромосферы Солнца показывают, что на месте факелов над ними также находятся яркие образования – флоккулы. Область, где расположена группа пятен и окружающие ее факелы, называется активной областью.

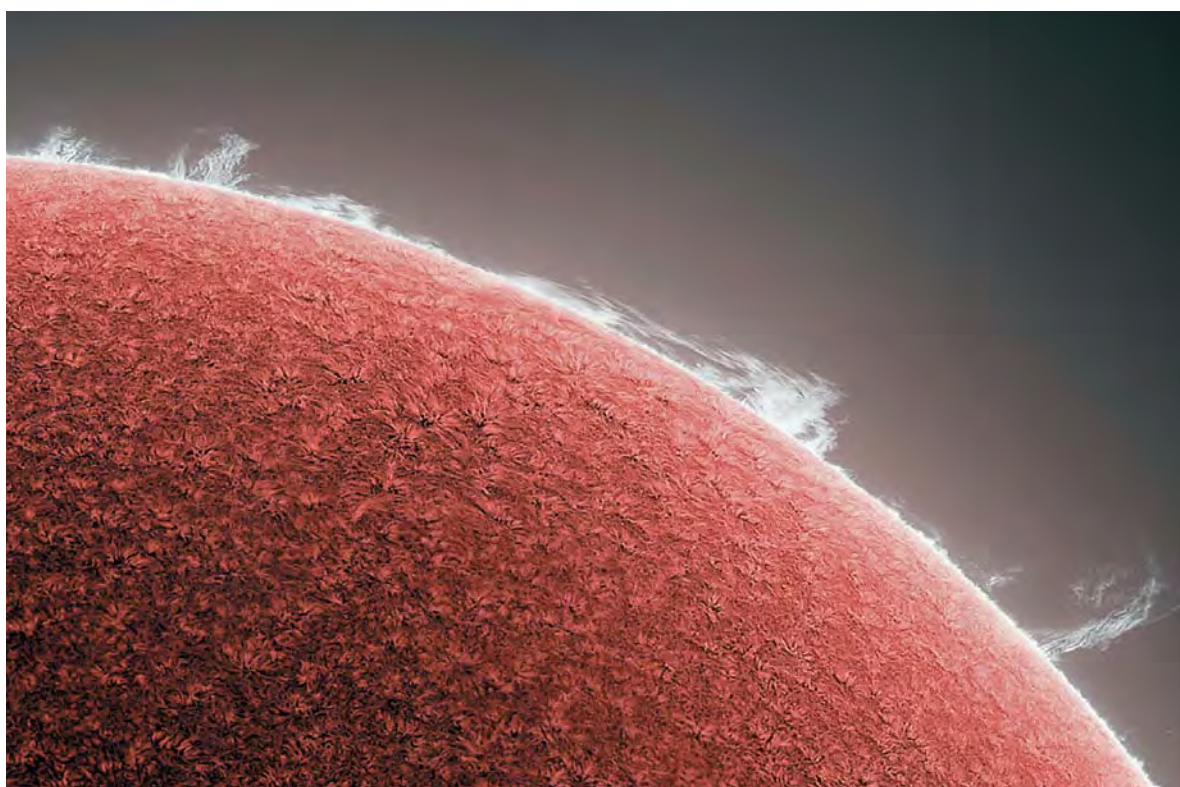


*Рис. 12. Яркие факельные гранулы вокруг солнечных пятен активной области. Снимок обсерватории Ландкави, Малайзия*



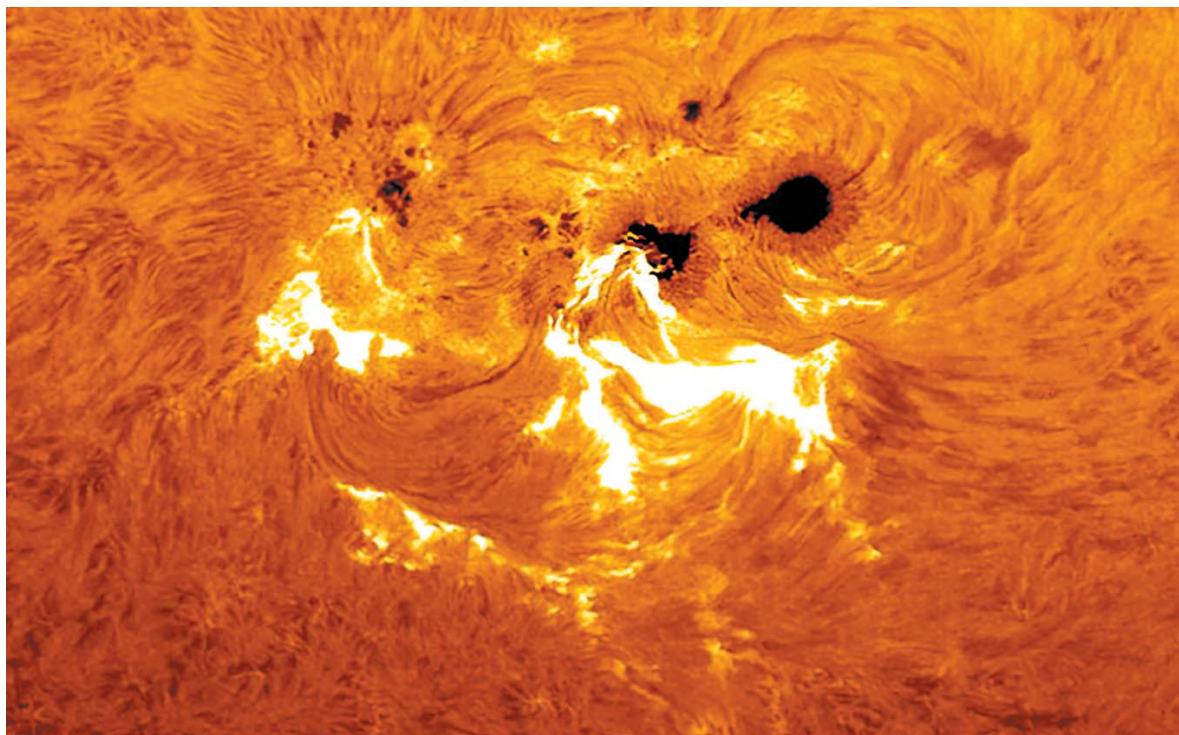
*Рис. 13. Корона Солнца на длине волны 17,1 нм. Видны две активные области (светлые участки), над ними — яркие петли магнитного поля. Снимок космической обсерватории SDO (США), 9 июня 2020 г.*

**Протуберанцы.** В хромосфере и нижней короне иногда наблюдаются облака сравнительно плотной плазмы — протуберанцы. Их можно наблюдать на краю Солнца во время полных солнечных затмений либо через телескопы-коронोगрафы в виде выступов самой разнообразной формы. При наблюдениях солнечной хромосферы через телескопы с фильтрами протуберанцы на фоне солнечного диска выглядят в виде длинных темных волокон. Измерения магнитных полей на Солнце показали, что протуберанцы (волокна) всегда находятся на границе между областями фотосферы с разной магнитной полярностью. Протуберанцы можно сравнить с магнитным каркасом в хромосфере, который поддерживает плазму и не дает ей под воздействием солнечной гравитации упасть на фотосферу.



*Рис. 14. Солнечные протуберанцы. Снимок Алана Фридмана*

**Вспышки.** В магнитных полях активной области накапливается огромная энергия, здесь текут очень сильные токи (потoki заряженных частиц, или плазмы). Иногда в активной области происходят грандиозные взрывообразные выделения магнитной энергии (солнечные вспышки). Плазма стремительно нагревается до миллиона градусов и более, что приводит к сильнейшему свечению в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах, возникает всплеск мощного радиоизлучения. Сильные магнитные поля ускоряют потоки протонов до огромных скоростей. В отдельных случаях во время вспышки целые сгустки плазмы вместе с их магнитным полем выбрасываются из активной области в окружающее пространство (выбросы коронального вещества). Как правило, солнечная вспышка продолжается несколько минут или десятков минут, в редких случаях мощное излучение постепенно спадает в течение нескольких часов.



*Рис. 15. Солнечная вспышка в хромосфере.  
Возле темных солнечных пятен видно ослепительное свечение плазмы,  
нагретой во время вспышки до миллионов градусов.  
Размеры самого крупного темного пятна превышают размеры Земли.  
Снимок взят на сайте <http://newsreaders.ru/showthread.php?t=2616>*

**Цикличность солнечной активности.** В середине XIX века был обнаружен феномен цикличности солнечной активности. Он выражается в том, что количество активных областей (групп пятен и окружающих их факельных полей) циклически меняется со временем — то нарастает до высоких значений, когда на Солнце одновременно наблюдаются десятки активных областей, то уменьшается почти до нуля. Один цикл солнечной активности (от минимума до следующего минимума) продолжается в среднем около 11 лет. Как правило, количество групп пятен, площадь факелов, число вспышек нарастает в течение 3–4 лет, находится на пике максимума 1–2 года и затем спадает почти до нуля в течение 5–6 лет, после чего начинается новый цикл. С каждым новым циклом происходит магнитная «переплюсовка» Солнца: меняются знаки магнитных полярностей на полюсах светила, поэтому полный магнитный цикл Солнца (цикл Хейла) составляет удвоенный 11-летний цикл — 22 года.

**Роль магнитных полей.** Вся проявления солнечной активности объясняются влиянием магнитных полей на Солнце. Солнце состоит из плазмы, а плазма — это электрически заряженные частицы. Вращение Солнца вокруг своей оси приводит к появлению в недрах Солнца сильных электрических токов, которые, согласно законам физики, порождают магнитное поле. Наружные слои Солнца вращаются дифференциально (точка на экваторе движется быстрее, чем точка на средних широтах, точка на средних широтах — быстрее, чем на высоких широтах и полюсах). Дифференциальное вращение вытягивает, изгибает, скручивает силовые линии магнитного поля в конвективной зоне Солнца. Тесно сплетенные жгуты магнитного поля всплывают к поверхности, и когда достигают фотосферы, формируют солнечные пятна. Более рассеянные магнитные поля формируют факелы вокруг пятен.

Именно сильные магнитные поля активных областей обеспечивают энергией вспышки и выбросы коронального вещества. Постоянное вращение Солнца по инерции на протяжении

всего периода его существования приводит к непрерывному рождению и трансформации магнитных полей в конвективной зоне Солнца.

Магнитные поля всплывают к поверхности, поднимаются в хромосферу и корону, формируя активные области и другие проявления солнечной активности. После распада активных областей на их месте в короне иногда возникают обширные области открытого магнитного поля — корональные дыры. Из этих областей магнитные силовые линии протягиваются далеко от Солнца, и вдоль этих линий в межпланетное пространство уходят потоки высокоскоростного солнечного ветра. В отличие от «обычного» солнечного ветра, потоки частиц из корональных дыр движутся со скоростью 700–800 км/с.

## Солнечно-земные связи

На Землю непрерывно падает солнечное электромагнитное излучение — от рентгеновского до радиоволн. Благодаря этому, наша планета нагрета до среднегодовой температуры около 15 градусов Цельсия, если вычислить среднее значение по всей поверхности Земли. Коротковолновая (рентгеновская и ультрафиолетовая) радиация приводит к ионизации верхних слоев атмосферы Земли (формируя ионосферу), а в стратосфере создает озоновый слой. Солнце является стабильным источником энергии, поэтому резких колебаний потока солнечной энергии не бывает, и в результате климат Земли на протяжении миллиардов лет меняется в сравнительно небольших пределах, — на нашей планете никогда не закипали океаны и не замерзала атмосфера. Земля оказалась на «удачном» расстоянии от Солнца, благодаря чему на Земле нет такой высокой температуры, как, например, на близкой к Солнцу Венере, и такой низкой температуры, как, например, на удаленном от Солнца Марсе.



Однако на фоне стабильного солнечного излучения иногда возникают проявления солнечной активности. Так, например, когда Земля попадает в высокоскоростной поток солнечного ветра, «дующего» из солнечной корональной дыры, усиливается ионизация верхних слоев земной атмосферы, может произойти слабая магнитная буря. Магнитной, или геомагнитной бурей называется изменение направления и напряженности магнитного поля Земли (геомагнитного поля) под влиянием прилетающих от Солнца заряженных частиц. Во время геомагнитной бури стрелка компаса начинает «метаться», отслеживая изменения в направлении геомагнитного поля, а магнитометры фиксируют быстрые хаотические изменения его напряженности.

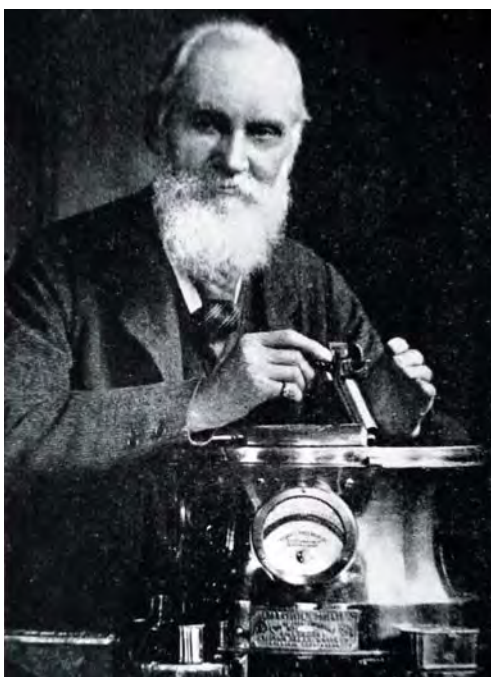
Но самые сильные воздействия солнечной активности на Землю связаны с мощными солнечными вспышками. Такие события могут сопровождаться выбросами больших пото-



*Рис. 16. Полярное сияние. Фото Дмитрия Федорова*

ков энергичных протонов, вызывая сильную геомагнитную бурю. Заряженные частицы, врываясь в верхние слои земной атмосферы, вызывают свечение — полярные сияния, которые покрывают порой огромные площади. Чем сильнее событие, тем дальше от полюсов простираются зоны свечения. Меняется при этом напряженность электрического поля в атмосфере нашей планеты.

Сильные и быстрые изменения геомагнитного поля могут приводить к наведению электрических токов в длинных токонесущих объектах — прежде всего в линиях электропередач. Во время сильнейшей геомагнитной бури, последовавшей после серии мощных вспышек на Солнце в 1989 году, из-за сильного тока, наведенного в обмотке силового трансформатора, на несколько часов была обесточена провинция Квебек в Канаде. Во время самой сильной бури после мощной вспышки 1 сентября 1859 года (событие Кэррингтона) искрились даже провода телеграфа, а полярные сияния наблюдались вблизи



*Рис. 17. Ричард Кристофер Кэррингтон (1826–1875), впервые наблюдал вспышку на Солнце 1 сентября 1859 г. Она оказалась сильнейшей за все время наблюдений вплоть до настоящего времени*

экватора. Сильные радиопомехи от солнечной вспышки в 2003 году привели к временному (на 10 минут) отказу спутниковой системы глобального позиционирования GPS. Во время сильных солнечных вспышек и следующих за ними геомагнитных бурь неоднократно фиксировались сбои электронных систем, в том числе на борту спутников, нарушения радиосвязи.

По мере быстрого повсеместного насыщения земной техносферы электронными устройствами становится все более важной их устойчивость к помехам во время геомагнитных бурь, порождаемых вспышками на Солнце. Повторение кэррингтоновского события, когда во время мощнейшей вспышки в сторону Земли были выброшены сразу несколько сгустков солнечной плазмы, в наше время может привести к катастрофическим последствиям. Достаточно представить себе беспилотные автомобили, самолеты, корабли, внезапно лишившиеся управления из-за отказа электронных систем навигации вследствие сильной геомагнитной бури, или обесточивание большого города, когда останавливаются лифты, трамваи и троллейбусы, отключаются электронные замки и другие устройства, отключается освещение и электропитание жизненно важных систем.

## **Влияет ли солнечная активность на живые организмы?**

Помимо воздействия на техносферу, всплески солнечного излучения и потоки частиц от вспышки могут влиять на живые организмы. Основы науки о влиянии солнечных явлений на биосферу Земли — гелиобиологии — заложил на рубеже XIX–XX веков российский ученый А.Л. Чижевский. Он обнаружил большое количество типов явлений и событий на Земле, число которых подчиняется одиннадцатилетнему ритму, что, скорее



*Рис. 18. Александр Леонидович Чижевский,  
1897–1964*

всего, связано с влиянием цикличности солнечной активности. В числе этих явлений — частота заболеваемости разными болезнями, урожайность различных сельскохозяйственных культур, изменения толщины годичных колец деревьев, эпидемии у животных (эпизоотии) и многое другое. Одиннадцатилетнюю цикличность в земных процессах Чижевский наглядно продемонстрировал в своей книге «Земное эхо солнечных бурь».

Помимо того, имеются данные, что некоторые люди ощущают изменения в электрическом и геомагнитном полях Земли, особенно происходящие на определенных частотах. Могут ухудшаться самочувствие, изменяться параметры крови и т.д. Эти явления редко бывают ярко выраженными, за многие годы эволюции живые организмы адаптировались к вариациям электромагнитного фона. Однако в ряде случаев, особенно во время редких сильных геомагнитных бурь, такая реакция может оказаться заметной.

А.Л. Чижевский сформулировал и гипотезу о том, что цикличность солнечной активности может влиять на социаль-

ные процессы, на напряженность политических процессов в обществе. Справедливость этой гипотезы требует проверки с помощью дальнейших исследований.

## Как использовать программу в учебном процессе?

Учебники астрономии, внесенные в утвержденный Министерством просвещения РФ федеральный перечень, а также многие учебно-методические пособия содержат несколько обязательных параграфов, посвященных Солнцу, его устройству, солнечной активности и солнечно-земным связям.

Эти темы могут изучаться классическим урочным способом. Можно рекомендовать учителю использование на одном из уроков планарного учебного видеофильма, подготовленного на основе полнокупольной программы «Солнце и жизнь Земли». Если есть возможность, имеет смысл показать школьникам полнокупольный вариант программы под куполом планетария.

Перед просмотром учебной программы учитель может дать задание школьникам целенаправленно просмотреть программу, чтобы получить, уяснить и сформулировать ответы на определенный перечень вопросов по теме.

### **Вопросы могут быть следующими:**

1. Каковы размеры и масса Солнца? Во сколько раз Солнце больше Земли?
2. Что такое Солнце — планета или звезда? Почему?
3. Почему Солнце светит (каков источник энергии Солнца, которое стабильно излучает уже 5 миллиардов лет)?
4. Как устроено Солнце внутри? (рассказать о зонах внутри Солнца).
5. Как устроена атмосфера Солнца? (рассказать о слоях солнечной атмосферы)

6. Что такое солнечная активность? Какие основные типы солнечной активности известны?
7. Что такое цикличность солнечной активности?
8. Что такое геомагнитная буря? Какова причина возникновения геомагнитных бурь?
9. В чем проявляется опасность солнечных вспышек?

Учитель может дать либо все, либо некоторые из этих вопросов, чтобы разобрать ответы после просмотра. Целе-направленный просмотр программы повышает внимательность, структурирует восприятие получаемой визуальной и вербальной информации. После просмотра школьники могут устно или письменно ответить на данные вопросы.

## Как использовать тему «Солнце и жизнь Земли» для подготовки докладов и проектов?

Темы, касающиеся Солнца и солнечной активности, могут использоваться для подготовки докладов и выполнения школьниками учебно-исследовательских проектов, включая обработку ежедневных наблюдений солнечных пятен, получаемых космической обсерваторией SDO (снимки обновляются на сайте <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/> ).

Можно проводить мониторинг групп солнечных пятен с использованием отечественного сайта [https://tesis.lebedev.ru/active\\_areas.html](https://tesis.lebedev.ru/active_areas.html) , где ежедневно обновляются данные о наблюдаемых на Солнце группах пятен, их координатах на солнечном диске, их площадях и размерах, количестве пятен в группе, а также солнечных вспышках в рентгеновском диапазоне и геомагнитных бурях.

**Какие дополнительные ресурсы могут быть использованы при изучении темы «Солнце»?**



Может быть рекомендована для внеклассного чтения научно-популярная книга С.А. Язева «Лекции о Солнце», адресованная школьникам и любителям астрономии (АСТ, 2018).

# Глоссарий

**Активная область на Солнце** — область на Солнце, включающая в себя группу пятен и окружающие ее факелы. В хромосфере и короне над активной областью могут находиться высокие петли магнитного поля, по которым течет плазма.

**Геомагнитная буря** — изменения направлению и напряженности геомагнитного поля (магнитного поля Земли), продолжающиеся в течение нескольких часов (в отдельных случаях в течение нескольких суток) под влиянием потока заряженных частиц, поступающих от Солнца.

**Дифференциальное вращение Солнца** — особенность вращения Солнца вокруг своей оси. Эта особенность заключается в том, что верхние слои Солнца вращаются с разной угловой скоростью в зависимости от широты: на низких широтах — быстрее, на высоких — медленнее. Так, во внешней системе координат, связанной с далекими звездами (сидерической), период вращения точки на экваторе Солнца составляет 24,47 суток, а для наблюдателя на Земле — 26,24 суток (синодический период). Вблизи полюсов Солнца сидерический период вращения оказывается близким к 30 суткам, а синодический — к 32 суткам. Обычно для описания вращения Солнца используется так называемая кэррингтоновская скорость вращения, характерная для точек на широтах 16 гелиографических градусов. На этой широте сидерический период обращения равен 25,38 суток, синодический — 27,2753 суток. Примерно с такой скоростью вращаются солнечные пятна, возникающие в диапазоне широт от 0 до 30 градусов.

**Зона лучистого переноса** — слой в недрах Солнца в пределах примерно от 0,3 до 0,7 радиуса Солнца. Температура внутри этой зоны уменьшается от 6,8 млн К на нижней границе до 2,4 млн К на верхней границе. Этого недостаточно для протекания термоядерных реакций, они происходят ниже (глубже), в ядре Солнца. В зоне лучистого переноса энергия переносится электромагнитным излучением (фотонами). Зона лучистого переноса вращается твердотельно (не дифференциально).

**Конвективная зона** — слой в недрах Солнца в пределах примерно от 0,7 радиуса Солнца до 1,0 радиуса (уровень фотосферы). Температура внутри этой зоны уменьшается от 2,4 млн К на нижней границе до



примерно 6 тысяч К на уровне фотосферы. В конвективной зоне энергия переносится снизу вверх конвективными восходящими потоками плазмы. Вблизи уровня фотосферы вещество остывает и опускается обратно, вглубь конвективной зоны, где снова нагревается и снова поднимается; такие движения формируют конвективные ячейки. Конвективная зона вращается дифференциально, где скорость вращения зависит от широты и от глубины.

**Протуберанцы** — облака плазмы в хромосфере и короне Солнца, поддерживаемые магнитными полями.

**Солнечная активность** — совокупность разных типов процессов и явлений магнитной природы, наблюдаемых в атмосфере Солнца. К разряду проявлений солнечной активности относятся солнечные пятна, факелы, протуберанцы, вспышки, выбросы коронального вещества, корональные дыры и т.д.

**Солнечная вспышка** — взрывообразное высвобождение энергии, запасенной в магнитном поле активной области. Общее количество энергии вспышки, выделяющейся во всех диапазонах электромагнитного излучения (от рентгеновского до радио), а также энергии, идущей на ускорение заряженных частиц и корональных выбросов вещества составляет  $10^{21}$ – $10^{25}$  Дж.

**Солнечные пятна** — относительно темные образования, наблюдаемые на фоне фотосферы Солнца, представляющие собой срезы (сечение) вертикальных жгутов сильного (1000–3000 Гс) магнитного поля, выходящих из-под фотосферы. Поскольку магнитное поле пятен частично подавляет конвекцию, температура пятен оказывается ниже температуры окружающей фотосферы (4500–5000 К), благодаря чему пятна излучают меньше и кажутся темнее окружающего фона.

**Солнце** — звезда, относящаяся к типу желтых карликов. Масса  $2 \cdot 10^{30}$  кг, диаметр на уровне фотосферы — 1 392 000 км (109,1 диаметра Земли), объем — около 1 300 000 объемов Земли, средняя плотность —  $1,4 \text{ г/см}^3$ . Светимость Солнца составляет  $4 \cdot 10^{26}$  Дж. Температура в центре Солнца превышает 15 млн К, температура фотосферы — около 6000 К. Возраст Солнца — около 5 млрд лет.

**Термоядерные реакции (реакции ядерного синтеза)** — реакции превращения ядер атомов водорода в ядра гелия под воздействием высокой температуры и высокой плотности в ядре Солнца. При этом

примерно 4,2 млн тонн водорода каждую секунду превращаются в электромагнитное излучение

**Факелы** — гранулы повышенной яркости, окружающие группы пятен (факельные площадки). Обладают максимальным контрастом на расстоянии примерно 60 градусов от центра солнечного диска, в центральной части диска Солнца не выделяются.

**Флоккулы** — яркие образования в хромосфере (верхняя часть фотосферных факелов).

**Ядро Солнца** — центральная часть Солнца, глубинный слой в недрах Солнца от центра до примерно 0,3 радиуса Солнца. Температура внутри ядра уменьшается от 15–16 млн К в центре Солнца до примерно 6,8 млн К на нижней кромке зоны лучистого переноса. В ядре Солнца протекают термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии. Любое издание.
2. Пасачофф Джей М. Солнце = занимательная астрономия: все тайны нашей звезды — Солнце. М.: АСТ:Астрель, 2008. — 332 с.
3. Попов Сергей. Вселенная. Краткий путеводитель по пространству и времени: от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого Взрыва до будущего Вселенной. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018. — 400 с.
4. Уайтхаус Дэвид. Биография Солнца. — М.: Эксмо, 2008. — 368 с.
5. Язев С.А. Лекции о Солнце. Москва : Издательство АСТ, 2018. — 320 с.

# МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ В ЭПОХУ МИССИИ GAIA

**А.С. Расторгуев,**

*доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой экспериментальной астрономии  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
заведующий отделом изучения Галактики и перемен-  
ных звезд Государственного астрономического института  
им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова,  
лауреат премии РАН им. Ф. Бредихина*

Ввод в строй крупных наземных и космических телескопов неизбежно приносит новые астрономические открытия. Мы лучше начинаем понимать, что происходит в нашей галактике — Млечном Пути — и в Местной Группе галактик. 19 декабря 2013 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана) с помощью носителя “Союз” с разгонным блоком “Фрегат” состоялся долгожданный запуск уникальной космической обсерватории GAIA (“Гея”), созданной Европейским космическим агентством и предназначенной для астрометрических, фотометрических и спектральных наблюдений около 2 млрд звёзд Млечного Пути.

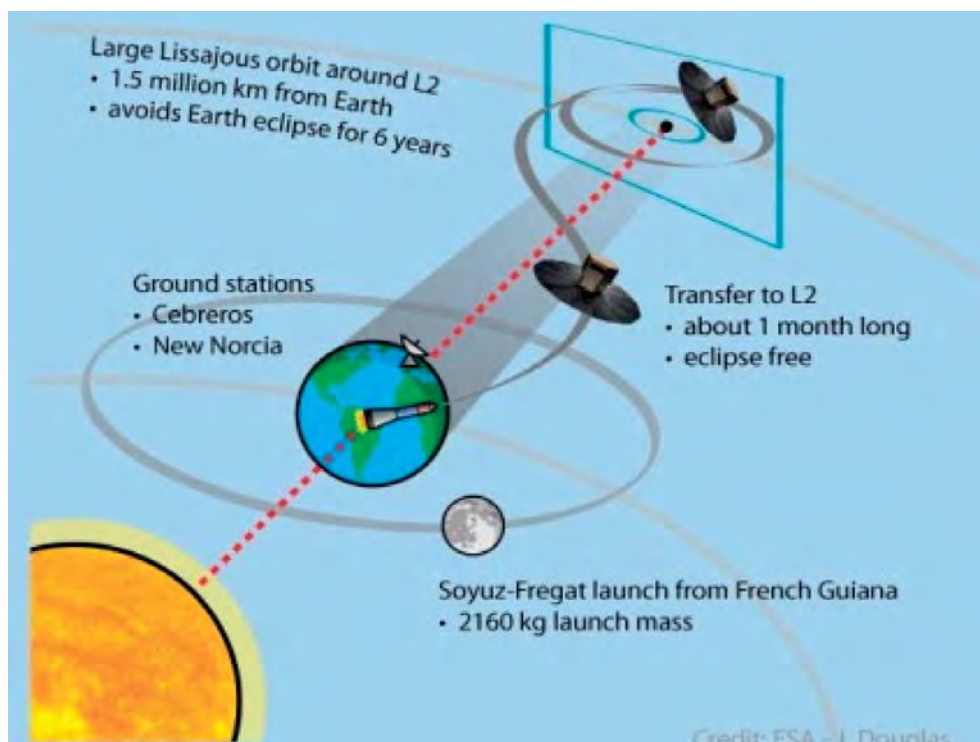
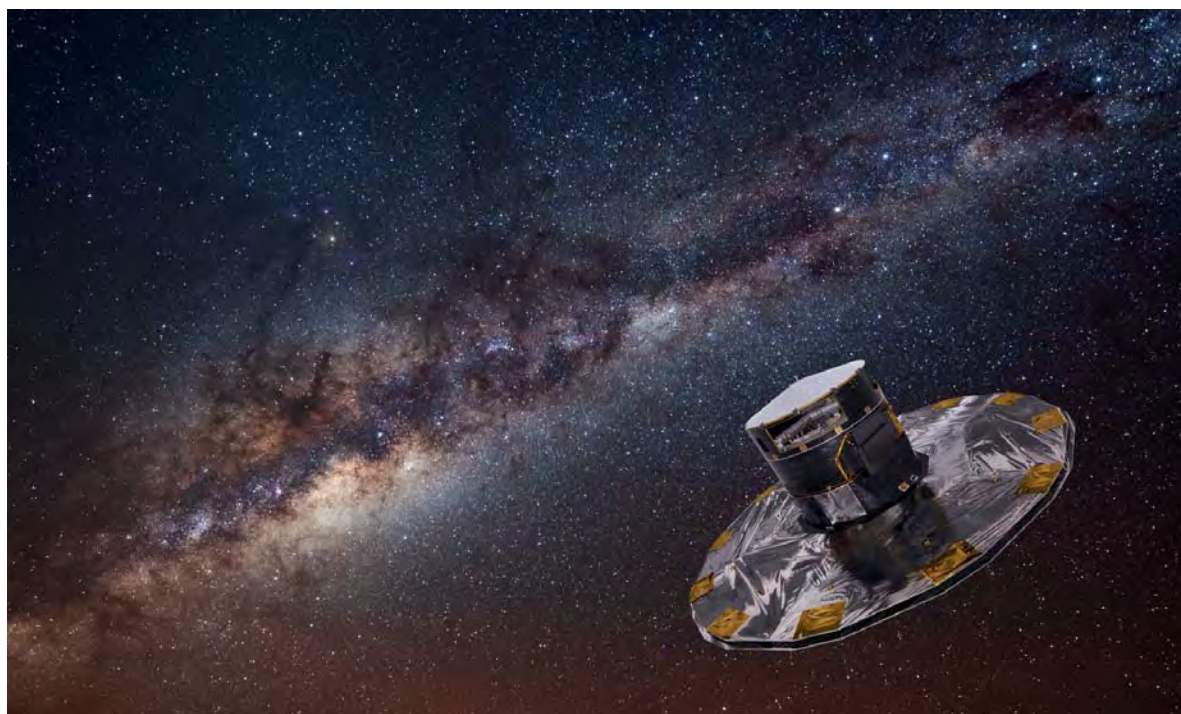


Рис. 1. Схема запуска обсерватории GAIA в точку Лагранжа L2 (около 1.5 млн км от Земли в сторону, противоположную от Солнца)

Одной из основных задач обсерватории GAIA являются высокоточные позиционные, т.е. астрометрические, наблюдения, с помощью которых, в частности, определяются тригонометрические параллаксы и собственные движения звёзд. Как известно, геометрический метод определения расстояний не требует никаких дополнительных знаний о физических свойствах звёзд и поэтому считается базовым, и именно он лежит в самой основе измерения расстояний во Вселенной, будучи первой ступенькой иерархической “лестницы” расстояний. Метод тригонометрических параллаксов сводится к измерению предельно малых углов смещения звёзд, описывающих на небе параллактические эллипсы вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца. Если вспомнить не такое уж далёкое прошлое, то в 1990-е годы астрономическое сообщество поражала точность параллаксов, измеренных космической обсерваторией HIPPARCOS: около 1 мсд (миллисекунды дуги), что было примерно в 100 раз точнее результатов имев-

шихся в то время наземных наблюдений. К слову, под углом 1 мсд был бы виден лист бумаги толщиной около 0.1 мм или человеческий волос с расстояния 20 км! На рубеже XX–XXI веков это казалось фантастическим инженерным достижением прецизионных измерительных технологий.

Однако космическая обсерватория GAIA показала, что и это не предел. По расчётам к концу миссии GAIA — а это ориентировочно 2025 год — точность измеренных небесных координат и тригонометрических параллаксов звёзд 15–17 звёздной величины должна достичь 10 мксд, т.е. возрасти ещё в 100 раз по сравнению с HIPPARCOS. А это уже волос, наблюдаемый с расстояния порядка 2000 км! Соответственно возрастёт и точность собственных движений, отражающих движение звёзд поперёк луча зрения. Столь высокие точности измерений обусловлены, с одной стороны, большим числом измерений (100–200) каждой звезды, а с другой — “привязкой” системы небесных координат к очень большому



*Рис. 2. Внешний вид космической обсерватории GAIA, наблюдающей звёзды путём сканирования при вращении аппарата вокруг своей оси и прецессии вокруг направления на Солнце*

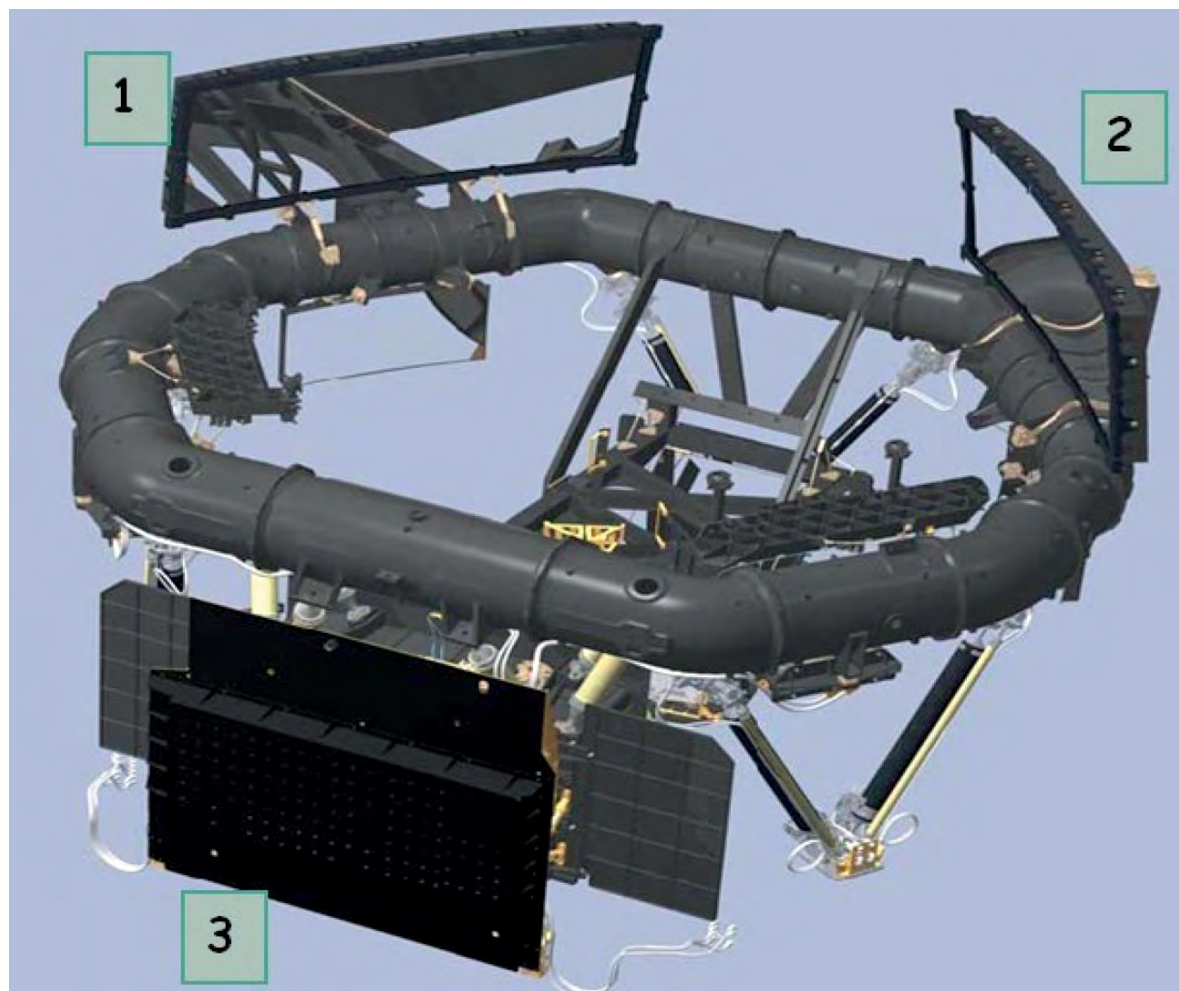
числу (сотни тысяч и миллионы) космических реперов — квазаров, которые из-за своей огромной удалённости можно считать неподвижными объектами, не меняющими своего положения на небе.

GAIA — многоцелевая обсерватория, выполняющая, помимо астрометрических наблюдений, также измерения блеска звёзд до 21–22 зв. вел. в двух широких полосах, синей и красной, и спектральные наблюдения и измерения лучевых скоростей. В начале декабря 2020 года астрономам стал доступен 3-й предварительный каталог звёздных данных, содержащий почти 2 млрд объектов. В нём более 1.5 млрд звёзд с измерениями блеска и цвета звёзд, почти 1.5 млрд измеренных параллаксов и собственных движений, более 7 млн звёздных спектров и измерений лучевой скорости, более 1.6 млн квазаров — объектов, задающих фундаментальную систему координат. GAIA исследовала изменения блеска более 550 тыс. переменных звёзд.



Рис. 3. Объём позиционных и фотометрических наблюдений по состоянию на начало 2022 г.

Обсерватория GAIA оснащена уникальным гигапиксельным приёмником излучения, состоящим из 106 ПЗС-матриц размером  $4500 \times 1966$  пикселей, формирующих массив размером  $104 \times 43$  см в общей фокальной плоскости (см. рис. 5) двух прямоугольных зеркал, расположенных под углом около  $106.5$  градусов друг к другу (см. рис. 4). Поле зрения телескопа GAIA составляет  $0.7$  кв. градуса. Смещение двух разнесённых на этот угол звёздных полей в единой фокальной плоскости позволяет измерять большие углы между звёздами и в конечном счёте создать глобальную прецизионную систему небесных координат, “привязанную” к квазарам.



*Рис. 4. Устройство обсерватории GAIA.  
1, 2 — главные зеркала с углом  $106.5$  град. между ними;  
3 — общая фокальная плоскость*

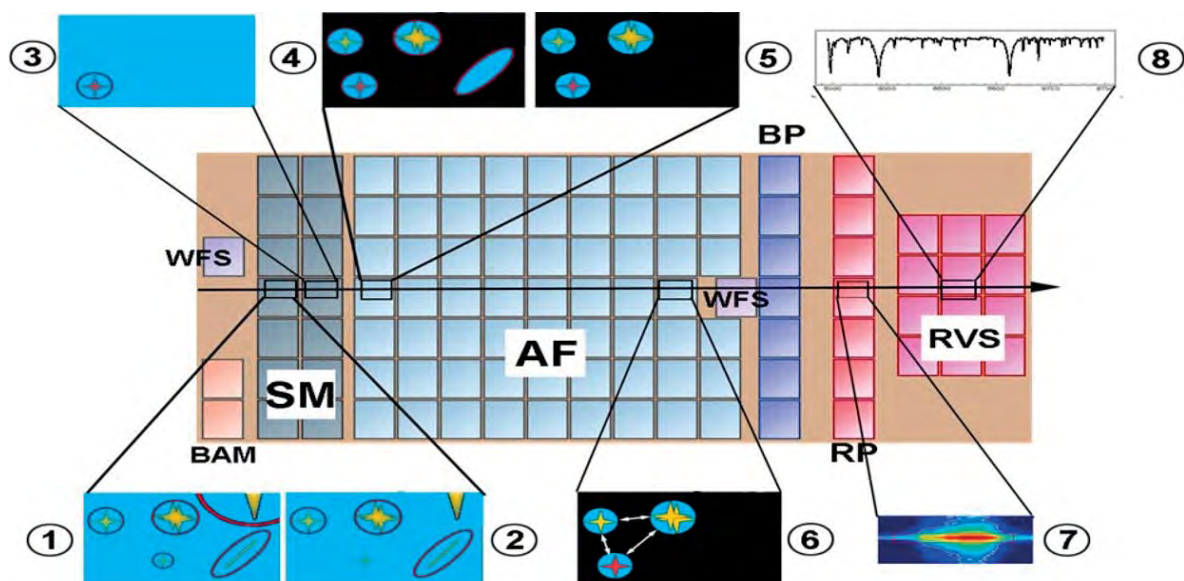


Рис. 5. Схема фокальной плоскости обсерватории GAIA.

Путь звезды при сканировании — слева направо.

SM (1–3) — массив отождествления объектов; AF (4–6) — астрометрический массив; BP, RP (7) — фотометрические массивы ПЗС-матриц; RVS (8) — спектральный массив и измерение лучевых скоростей. BAM — ПЗС-матрицы мониторинга базового угла между главными зеркалами; WFS — ПЗС-матрицы контроля качества фокальной плоскости

Результаты GAIA имеют исключительно важное значение для всей современной астрономии и астрофизики благодаря невиданной ранее точности расстояний, измеренных именно абсолютным методом. Так, диапазон расстояний от Солнца, измеренных с хорошей относительной точностью, например, выше 10%, уже сейчас возрос со 100 пк (как было в эпоху HIPPARCOS) до 3–5 кпк для звёзд ярче 15 зв. вел., а к концу миссии может возрасти до 10–15 кпк. Это открывает новые возможности для прямого определения светимостей звёзд, уточнения наших знаний о звёздных населенных и строении Млечного Пути и его компонентов, для глубокого изучения свойств звёздных скоплений и надёжной оценки их возрастов. Кроме того, наличие очень точных собственных движений и лучевых скоростей звёзд даёт возможности детального изучения кинематики не только Млечного Пути и его населений,



но и его близких спутников, таких как Магеллановы Облака и некоторые другие карликовые спутники.

На диаграмме ГР для близких звёзд Млечного Пути хорошо выделяется Главная Последовательность звёзд-карликов, ветвь красных гигантов и большая популяция белых карликов (см. рис. 6). На такой же диаграмме для БМО указаны звёзды молодых и старых населений.

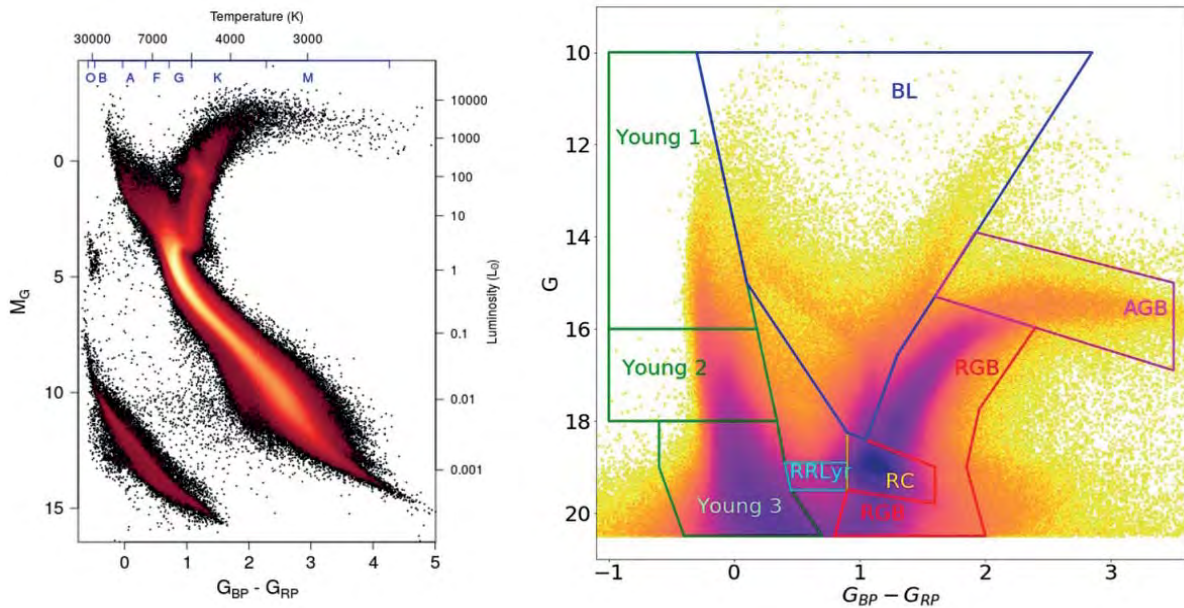


Рис. 6. Диаграммы Герца для звёзд Млечного Пути с малым поглощением (слева) и для звёзд Большого Магелланова Облака (справа) по данным GAIA. Цветовая гамма показывает населённость ветвей диаграммы показатель цвета ( $G_{BP} - G_{RP}$ ) — абсолютная звёздная величина  $M_G$  (слева) и видимая величина  $G$  (справа). Разные стадии эволюции звёзд: Young 1–3 — молодые звёзды на стадии Главной Последовательности; BL — массивные молодые проэволюционировавшие звёзды, включая цефеиды; AGB — асимптотическая ветвь гигантов; RGB — ветвь красных гигантов; RC — звёзды красного “сгущения”; RR Lyr — старые звёзды, пульсирующие переменные типа RR Лиры

Хорошо известно, что из-за сильнейшего межзвёздного поглощения, искажающего картину пространственного распределения объектов, картина спирального узора в диске

Млечного Пути до сих пор остаётся большой загадкой. Плохо известны глобальная геометрия спиральных рукавов и даже их число! Выделяются только несколько фрагментов спиралей в широких окрестностях Солнца. В этом плане хорошие перспективы предоставляют нам данные миссии GAIA для молодых объектов, которые, как традиционно считается, “трассируют” области звездообразования в спиральных рукавах. К таким объектам, в частности, относятся цефеиды — молодые пульсирующие сверхгиганты, и молодые рассеянные скопления. Цефеиды являются так называемыми “стандартными свечами” благодаря наличию у них зависимости “период пульсаций — светимость”, а расстояния до рассеянных скоплений могут определяться методом наложения эволюционных изохрон, поэтому ещё до эпохи GAIA они неоднократно использовались для изучения спирального узора. Данные GAIA позволили существенно улучшить эти исследования, в первую очередь благодаря тщательному выделению членов скоплений по критерию близости собственных движений. Современная картина локальных фрагментов спиральных рукавов показана на рис. 7. Углы закрутки меняются от 9 до 15 градусов.

Зная точные расстояния, лучевые скорости и собственные движения сотен тысяч и миллионов звёзд, мы сравнительно легко можем вычислить их пространственные скорости и исследовать характер звёздных движений, определить орбиты звёзд, т.е. изучить кинематику звёздных населений. На рис. 8 показаны детальные кинематические карты для звёзд, населяющих тонкий диск Млечного Пути. Подобные карты составлены впервые.

На рис. 9 показан вертикальный кинематический разрез Млечного Пути, на котором хорошо видно, что скорость вращения сильно зависит от вертикальной координаты; она максимальна в тонком диске и заметно уменьшается с ростом расстояния, примерно от 235 км/с до 155 км/с на расстоянии порядка 2.5-3 кпк от плоскости Галактики. Дис-

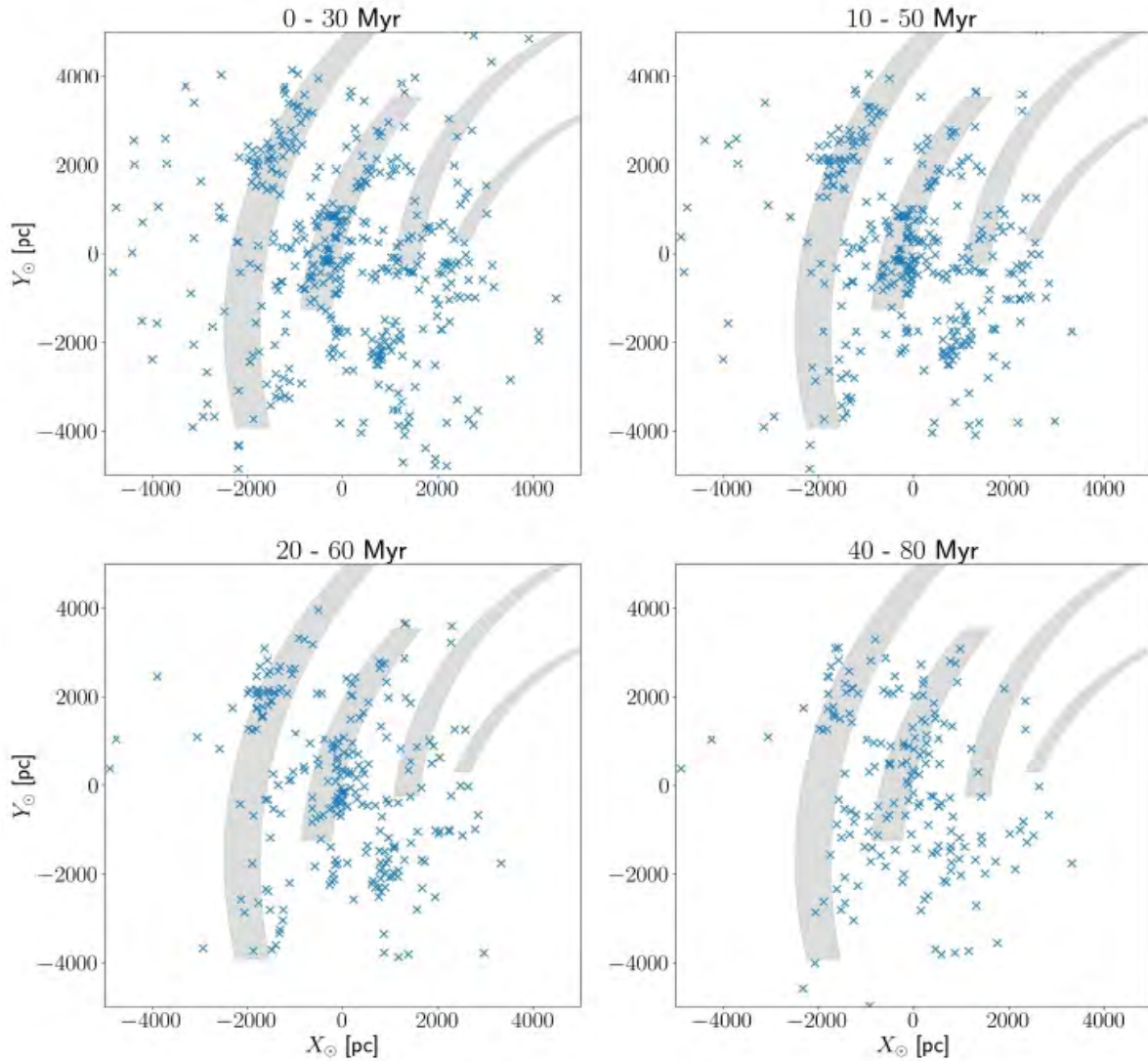


Рис. 7. Локальные фрагменты спиральных рукавов Млечного Пути по данным GAIA о пространственном распределении молодых рассеянных скоплений разного возраста (моложе 30 млн лет, 10–50 млн лет, 20–60 млн лет, 40–80 млн лет). Солнце — в начале координат, центр Млечного Пути справа, серые полосы — положения рукавов, определённые по радиointерферометрическим измерениям тригонометрических параллаксов космических мазеров, связанных с молодыми объектами в областях звездообразования

персия скоростей показывает противоположное поведение, она растёт примерно от 20 км/с до 80 км/с в том же диапазоне расстояний. Подобная карта — зримое доказательство пространственно-кинематических различий между такими важными компонентами Галактики, как тонкий и толстый

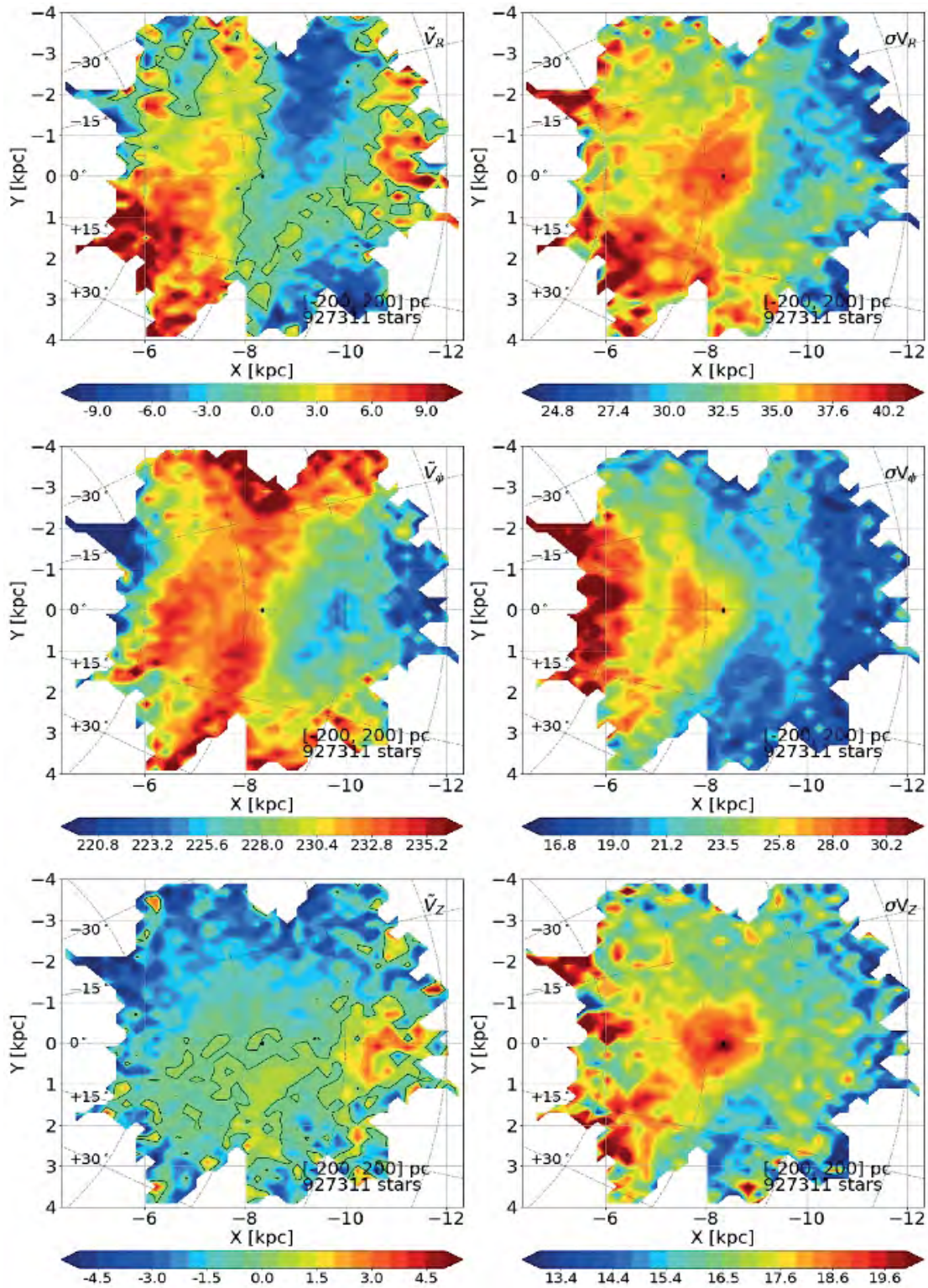


Рис. 8. Кинематическая карта тонкого диска (вид плашмя) по данным GAIA о пространственном распределении и скоростях около 1 млн красных гигантов. Центр Млечного Пути слева, Солнце с координатами (8 кпк, 0 кпк). Левые панели – радиальная скорость, скорость вращения и вертикальная скорость (сверху вниз); правые панели – соответствующие дисперсии скоростей. Значения скорости обозначены цветовой гаммой

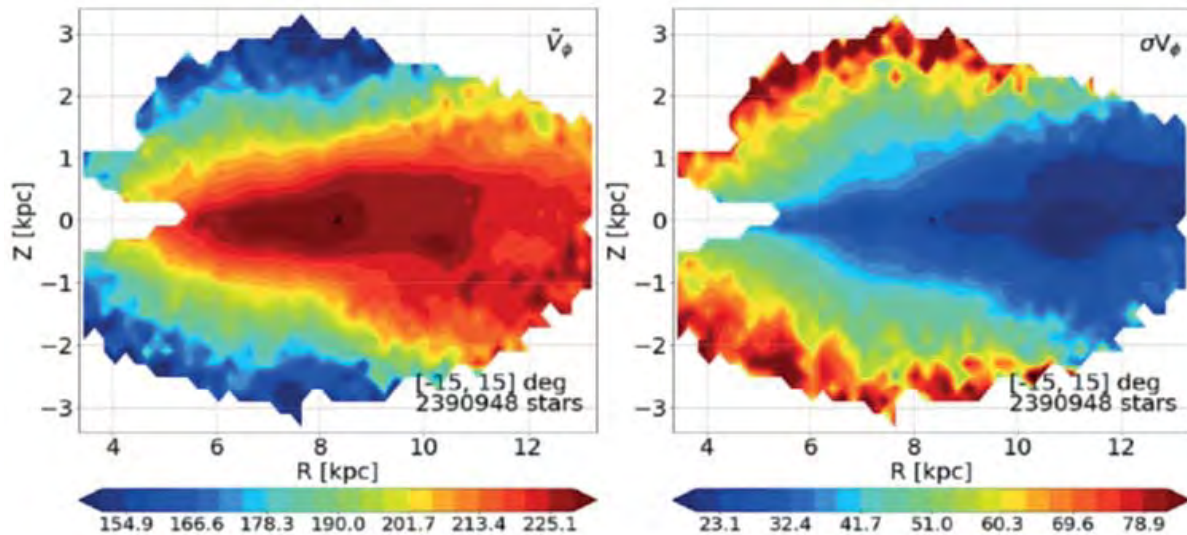


Рис. 9. Кинематическая карта Млечного Пути (вертикальное сечение) по данным GAIA о пространственном распределении и скоростях около 2.5 млн красных звёзд. Центр Млечного Пути слева, Солнце с координатами (8 кпк, 0 кпк). Левая панель — скорость вращения; правая панель — соответствующая дисперсия скоростей. Значения скорости обозначены цветовой гаммой

диск, которые также различаются возрастом и химическим составом. В этом плане невозможно переоценить роль GAIA в нашем понимании происхождения и эволюции населений Млечного Пути.

Отметим ещё один из интереснейших и важнейших результатов, полученных в ходе наблюдений миссии GAIA. Как известно, звёздные скопления, карликовые спутники Млечного Пути, как и вообще все звёздные системы, эволюционируют. Сближения между звёздами сопровождаются обменом энергией, благодаря чему некоторые звёзды могут покинуть систему, уменьшая её массу. Этот процесс, часто называемый “испарением”, идёт даже в изолированных системах, но его эффективность многократно усиливается в приливном поле массивной галактики, такой, как Млечный Путь. Покидая скопление, звёзды длительное время продолжают двигаться по той же орбите, что и само скопление: половина звёзд опережает его, а вторая половина отстаёт;

образуется своеобразный “шлейф”, в центре которого находится скопление или карликовая галактика. Звезды “шлейфа” на фоне более близких и более далёких звёзд выделяются несколько повышенной видимой плотностью и имеют близкие пространственные скорости. Их угловая протяжённость достигает десятков градусов.

До миссии GAIA было известно всего несколько таких “шлейфов” от распадающихся шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников. По наблюдениям GAIA число таких звёздных потоков на всём небе многократно возросло. Их ценность в том, что своей формой они обрисовывают галактическую орбиту “родительского” скопления в гравитационном поле Млечного Пути. Следовательно, по наблюдениям “шлейфов” появляется уникальная возможность восстановить вид гравитационного потенциала Галактики и распределения масс в ней, что практически невозможно сделать другими методами. Помимо формы потока GAIA предоставляет также данные о блеске звёзд, их расстояни-

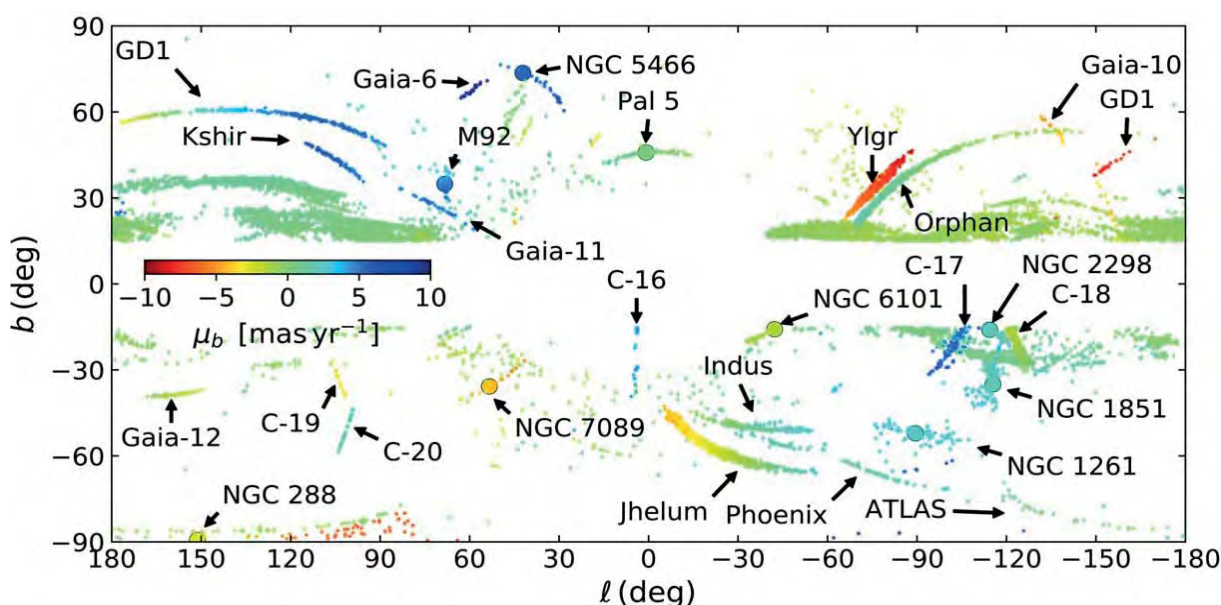


Рис. 10. Приливные “шлейфы” скоплений на небесной сфере, обнаруженных миссией GAIA. Цвет указывает на величину собственного движения

ях, собственных движениях и лучевых скоростях, т.е. даже о возрасте скопления и пространственно-кинематической структуре его орбиты. Обладание многомерной информацией о большом числе звёздных потоков многократно углубляет наши знания о распределении масс в Млечном Пути и о судьбе распадающихся скоплений и карликовых галактик, которые в большом количестве были поглощены Млечным Путём за его долгую жизнь.

Мы привели только небольшую часть ценных и важных результатов, полученных космической обсерваторией GAIA. Многие открытия буквально перевернули наши представления о Млечном Пути и его населении, но до завершения миссии еще несколько лет, и новые открытия ещё впереди...

# ГЛАВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В АСТРОНОМИИ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

**Авторский коллектив**

*физико-астрономического отдела Государственного музея  
истории космонавтики им. К.Э. Циолковского:  
Д.О. Фетисов, Я.А. Фетисова, А.В. Ивашкина, А.Ю. Алексеев,  
под редакцией Е.Н. Типикиной*

## Гравитационные волны и работа гравитационно-волновых обсерваторий

В последние годы особую важность приобрели исследования такого наблюдаемого следствия из общей теории относительности, как гравитационные волны. Они представляют собой некую «рябь» в пространственно-временном континууме и испускаются всеми телами, имеющими массу. Однако, чтобы быть заметными для наблюдения, гравитационные волны должны испускаться сверхмассивными телами.

Сама возможность проведения таких исследований появилась в результате введения в эксплуатацию двух обсерваторий: LIGO (Большой лазерный интерферометр гравитационных волн) в 2002 году в США и интерферометра Virgo Европейской Гравитационной обсерватории в 2003 году.



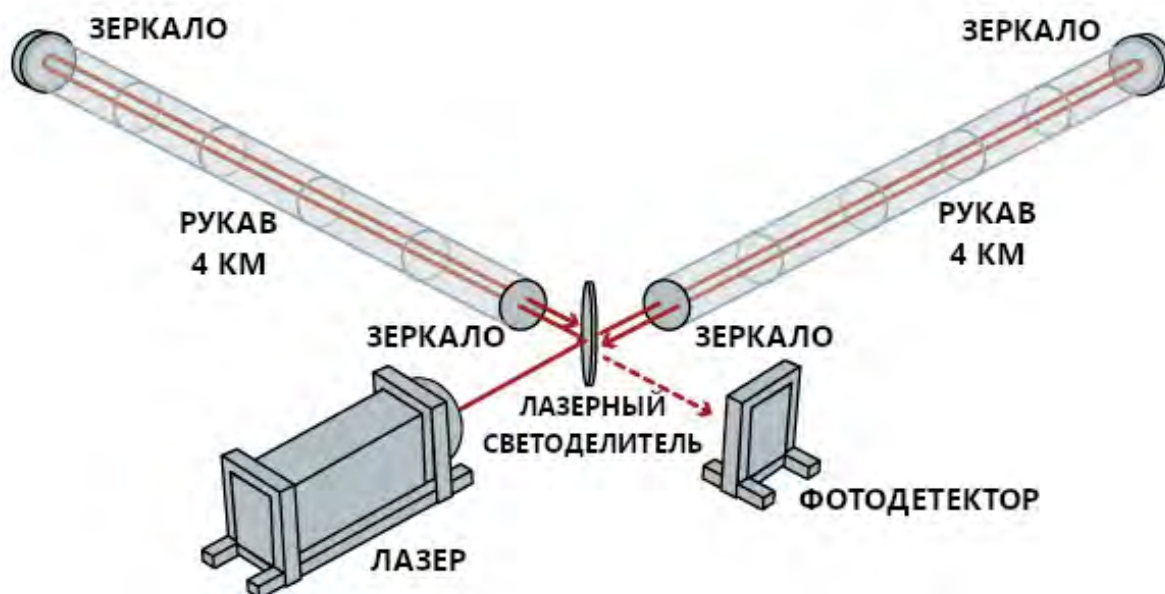


Рис. 1. Устройство гравитационного интерферометра.  
 Источник: [theglobeandmail.com](http://theglobeandmail.com)

Принцип работы гравитационного интерферометра основан на явлении интерференции когерентного света лазера в двух перпендикулярных рукавах. Выполненные с огромной точностью установки фиксируют изменения пространства при прохождении гравитационной волны по нарушению интерференции света лазера, предварительно расщепленного светоделителем на два пучка. Даже при размере интерферометра LIGO с длиной рукавов в 4 км наблюдения колебаний тестовых масс с амплитудой в  $10^{-21}$  м являются чрезвычайно сложной задачей.

Точность первых детекторов в открытых обсерваториях оказалась недостаточной для регистрации волн, и в 2008 году на интерферометре LIGO начался процесс усовершенствования детекторов. В результате кропотливой работы международной коллаборации ученых в 2015 году была запущена новая серия наблюдений, и 11 февраля 2016 года совместный коллектив авторов обсерваторий LIGO и Virgo опубликовал в журнале *Physical Review Letters* статью, сообщающую об



*Рис. 2. Интерферометр LIGO в Хэнфорде.  
Источник: [rortech.ru](http://rortech.ru)*



*Рис. 3. Внутри детектора Virgo.  
Источник: [www.theepochtimes.com](http://www.theepochtimes.com)*

открытию гравитационных волн. Это выдающееся достижение, к которому человечество шло в течение десятков лет, было отмечено в 2017 году Нобелевской премией по физике.

Сама регистрация волн произошла 14 сентября 2015 года. Форма сигнала соответствовала теоретическому предсказанию эффекта от слияния двух черных дыр с массами 36 и 29 солнечных. В результате слияния образовалась черная дыра с массой, равной 62 солнечным массам. При этом энергия в размере 3 солнечных масс была излучена в пространство в виде гравитационных волн, которые и были зарегистрированы.

Важными этапами в работе коллаборации стали 3 периода наблюдений: первый — с 12 сентября 2015 года по 19 января 2016 года, в этот период, кроме события 14 сентября, было зарегистрировано еще 2 события. Второй период — с 30 ноября 2016 года по 25 августа 2017 года. И третий период, который начался в апреле 2019 года и закончился в марте 2020 из-за ограничений по COVID-19. В ходе трех периодов наблюдений было зафиксировано 5 событий с высоким уровнем надёжности и один кандидат.

Важным событием также стала регистрация гравитационно-волнового всплеска, произошедшего в результате слияния двух нейтронных звёзд и зарегистрированного 17 августа 2017 года.

В настоящее время наступил очередной период усовершенствования точности детекторов. Так же в разработке находится проект интерферометра LIGO-India (INDIGO), который должен быть введен в эксплуатацию в 2024 году.

## **Солнечная система. Достижения последних лет**

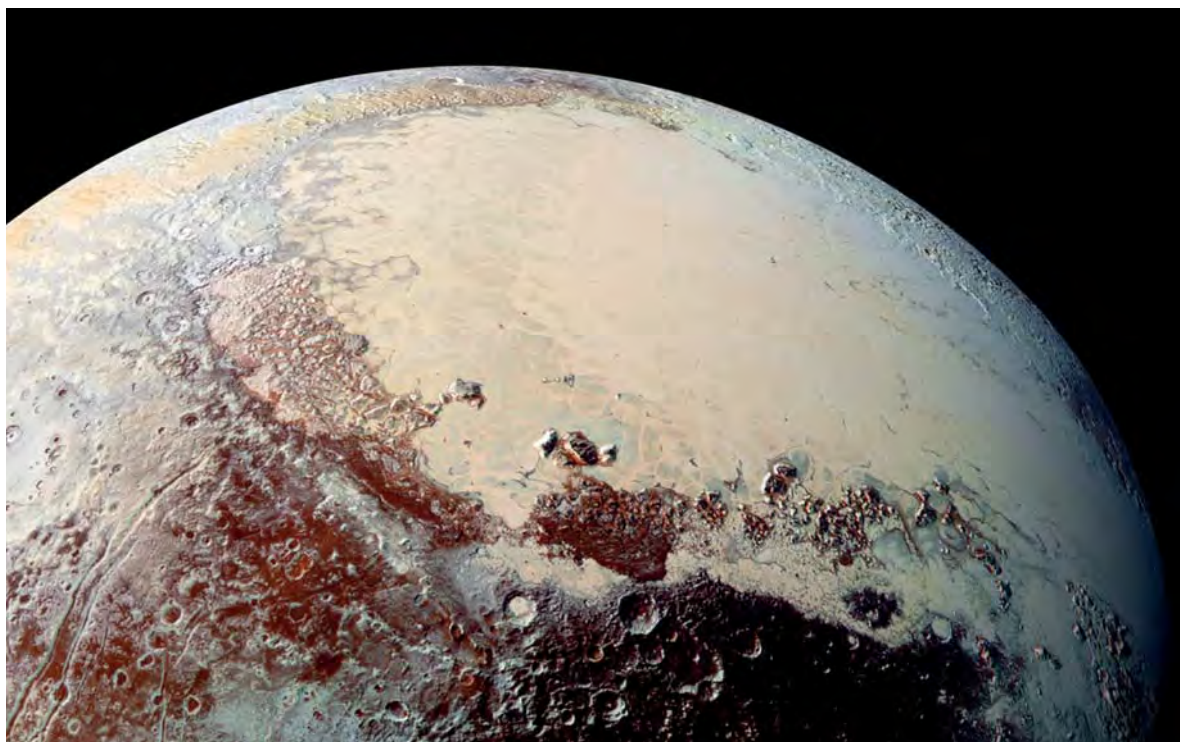
Интенсивно развивающимся направлением астрономии остаются исследования Солнечной системы, особенно её дальних областей. После открытия большого количества транснепту-



*Рис. 4. АМС «Новые горизонты». Подготовка к полету.  
Источник: 22century.ru*

новых объектов в конце XX — начале XXI века было принято решение о запуске автоматической межпланетной станции «Новые горизонты» для исследования Плутона и объектов пояса Койпера.

АМС «Новые горизонты» была запущена 19 января 2006 года ракетой-носителем «Атлас-5» с космодрома на мысе Канаверал. При этом станция стала первым космическим аппаратом, получившим достаточную для ухода из Солнечной системы скорость непосредственно при запуске. Большую часть времени своего полёта станция провела в спящем режиме с целью экономии ресурсов и затрат на управление. Пролёт системы около Плутона состоялся 14 июля 2015 года. Были получены снимки и большой объём иных научных данных о Плутоне, его спутнике Хароне, и четырёх малых спутниках.



*Рис. 5. Фотография Плутона, сделанная АМС «Новые горизонты».  
Источник: nasa.gov*

Через четыре года, 1 января 2019 года, «Новые горизонты» изучили с близкого расстояния транснептуновый астероид пояса Койпера Аррокот. По состоянию на 2022 год, «Новые горизонты» удалились на расстояние более 50 а.е. от Солнца. Станция продолжает вести исследования космического пространства и астрофизические наблюдения.

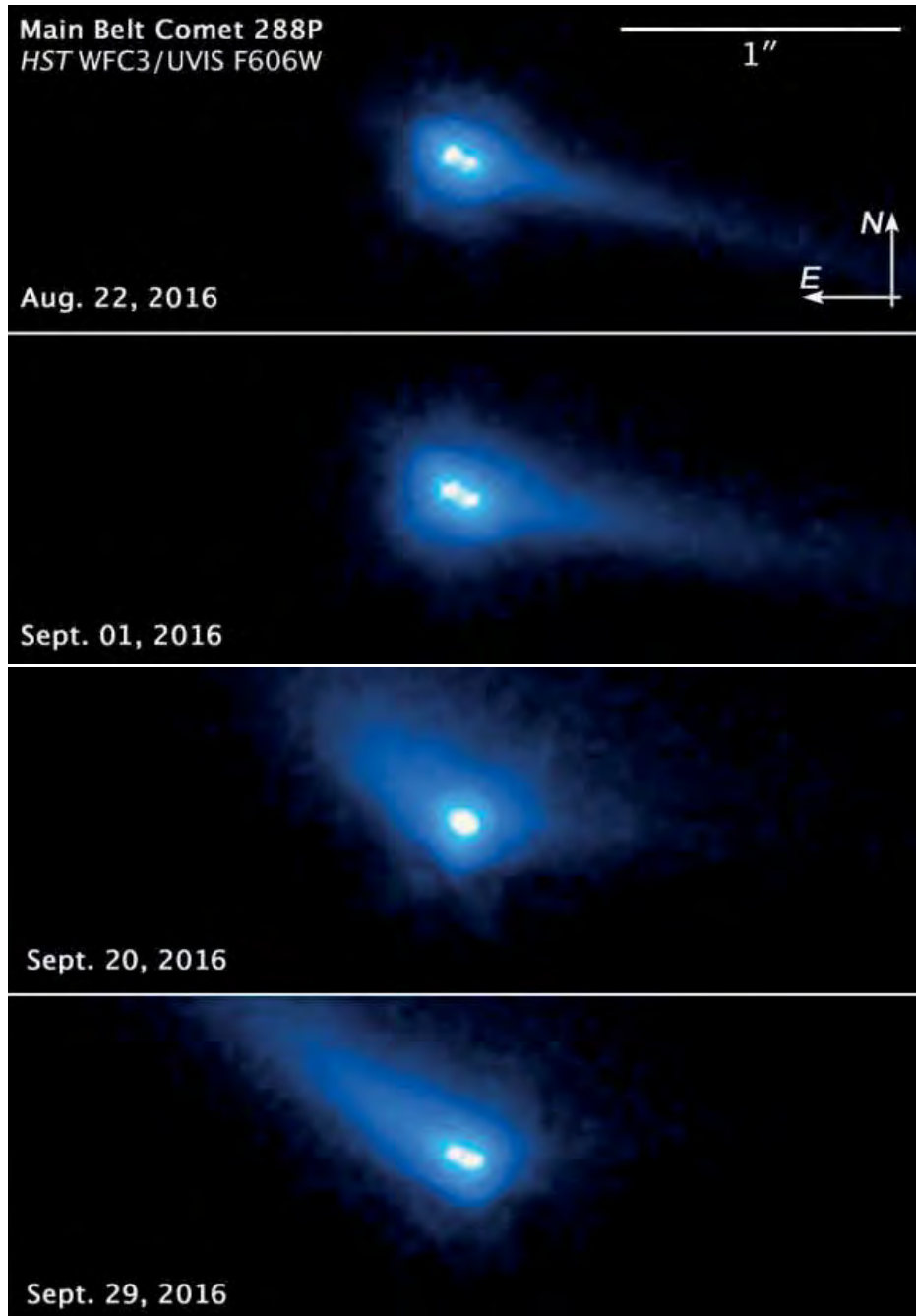
В 2017 году красивый финал получила другая космическая миссия – исследования Сатурна аппаратом «Кассини», который был запущен в 1997 году. Проработав 20 лет, аппарат получил множество полезной информации и прекрасных фотографий Сатурна, важные научные данные о природе его колец. Выработав срок своей работы, «Кассини» совершил 22 пролёта между Сатурном и его внутренним кольцом, а затем был направлен в атмосферу планеты, где сгорел 15 сентября 2017 года, до последнего момента передавая научную информацию.



*Рис. 6. Кольца Сатурна. Фотография АМС «Кассини».  
Источник: nasa.gov*

Продолжаются исследования и более мелких объектов Солнечной системы. Заметным событием планетарной астрономии стало открытие спутника S/2015 (136472) 1 у карликовой планеты Макемаке. Сама карликовая планета была открыта в 2005 году, а спутник — лишь в 2015 году с помощью телескопа «Хаббл».

Другое интересное открытие было сделано в 2016 году: с помощью телескопа «Хаббл» удалось подтвердить комет-



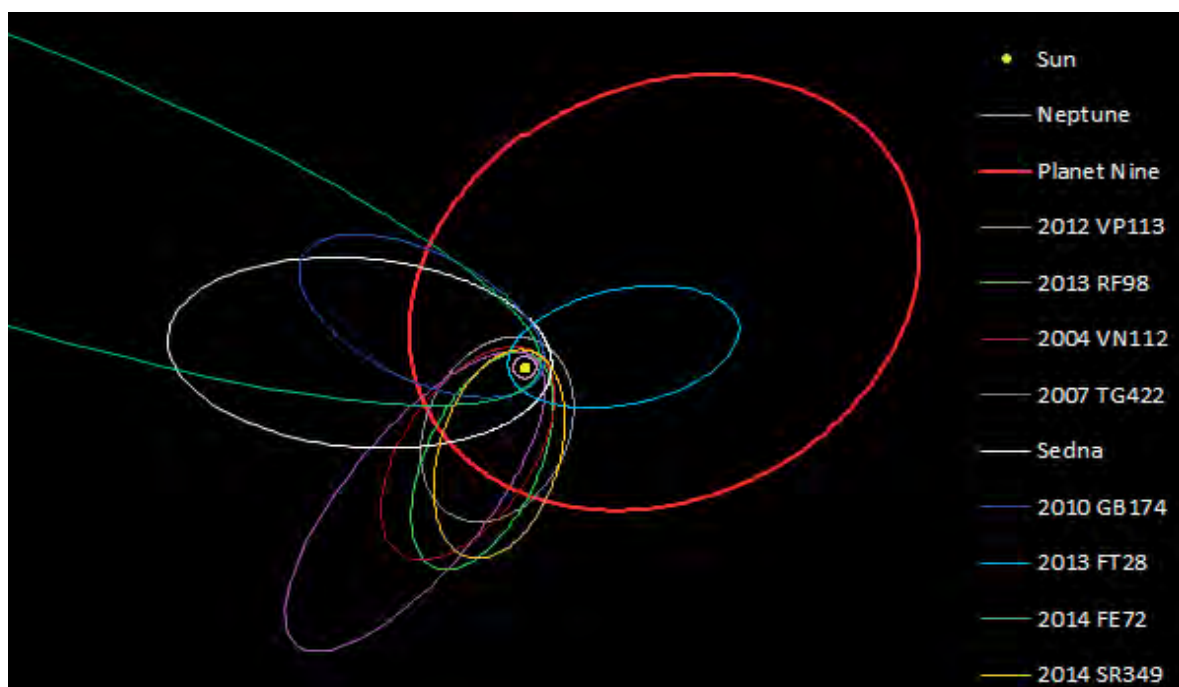
*Рис. 7. Фотографии 288P/(300163) 2006 VW139, сделанные телескопом «Хаббл».  
Источник: nasa.gov*

ную природу двойного объекта 288P/(300163) 2006 VW139 главного пояса астероидов. Он был открыт в 2006 году и всё это время считался астероидом. Кометы в главном поясе астероидов встречаются довольно редко (открыто всего 20 таких

комет), и обнаружение на фотографиях кометного хвоста у этого объекта сначала вызывало недоумение.

С помощью орбитального телескопа удалось получить более чёткие изображения, где хорошо различимы уже два тела почти одинакового размера (приблизительно 1,8 км в диаметре). Также было точно установлено, что газо-пылевой хвост объекта отклоняется в зависимости от положения относительно Солнца, что окончательно подтвердило его кометную природу.

Заметным событием последних лет стало выдвижение гипотезы, объясняющей странное поведение некоторых объектов в транснептуновой области. В начале 2016 года Константин Батыгин и Майкл Браун на основе математического моделирования предположили, что похожие орбиты шести транснептуновых объектов могут быть объяснены существованием Девятой планеты, и рассчитали возможные параметры её орбиты.



*Рис. 8. Орбиты шести изначальных обособленных ТНО и трёх новых: 2013 FT28, 2014 FE72, 2014 SR349.*

*Красным была обозначена орбита Девятой планеты.*

*Источник: <https://ru.wikipedia.org/>*



Эта гипотеза также может объяснить существование дальних объектов с орбитами, перпендикулярными плоскости вращения внутренних планет, а также наклон оси вращения Солнца. Чтобы оказывать необходимое влияние, масса девятой планеты должна быть не меньше 10 масс Земли. Гипотеза Брауна-Батыгина вызвала достаточно оживленный интерес, и поисками девятой планеты стали заниматься разные научные группы. При этом звучат и скептические голоса, заявляющие, что транснептуновая область достаточно неплохо изучена, в том числе и орбитальными телескопами, и такой большой объект, как девятая планета, вряд ли мог скрыться от глаз наблюдателей.

Непрерывно растущие наблюдательные возможности астрономов в последние годы приводят ко всё новым и новым интересным открытиям. В 2017 году был положен отсчёт регистрации межзвёздных объектов, пролетающих сквозь Солнечную систему. 19 октября 2017 года система телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования Pan-STARRS, расположенная на Гавайях, открыла первый астероид, прилетевший из межзвёздного пространства (рис. 9). Он получил имя Оумуамуа, что в переводе с гавайского языка значит «разведчик» или «посланник издалека».

Интересной оказалась и форма объекта. По изменениям наблюдаемого блеска было определено, что Оумуамуа — сильно вытянутое тело длиной примерно 180 и шириной 30 метров. Это дало возможность энтузиастам поиска внеземных цивилизаций сразу выступить с предположением, что это межзвёздный корабль инопланетян. Однако научные наблюдения не свидетельствуют об искусственном происхождении Оумуамуа.

Триумфом любительской астрономии стало открытие другого межзвёздного гостя Солнечной системы. Комета диаметром около 20 км с небольшим хвостом была открыта на границе созвездий Рыси и Рака 30 августа 2019 года астрономом-любителем Геннадием Борисовым. Являясь инженером



*Рис. 9. Первый известный межзвездный астероид Оумуамуа  
в представлении художника.  
Источник: <https://ru.wikipedia.org/>*



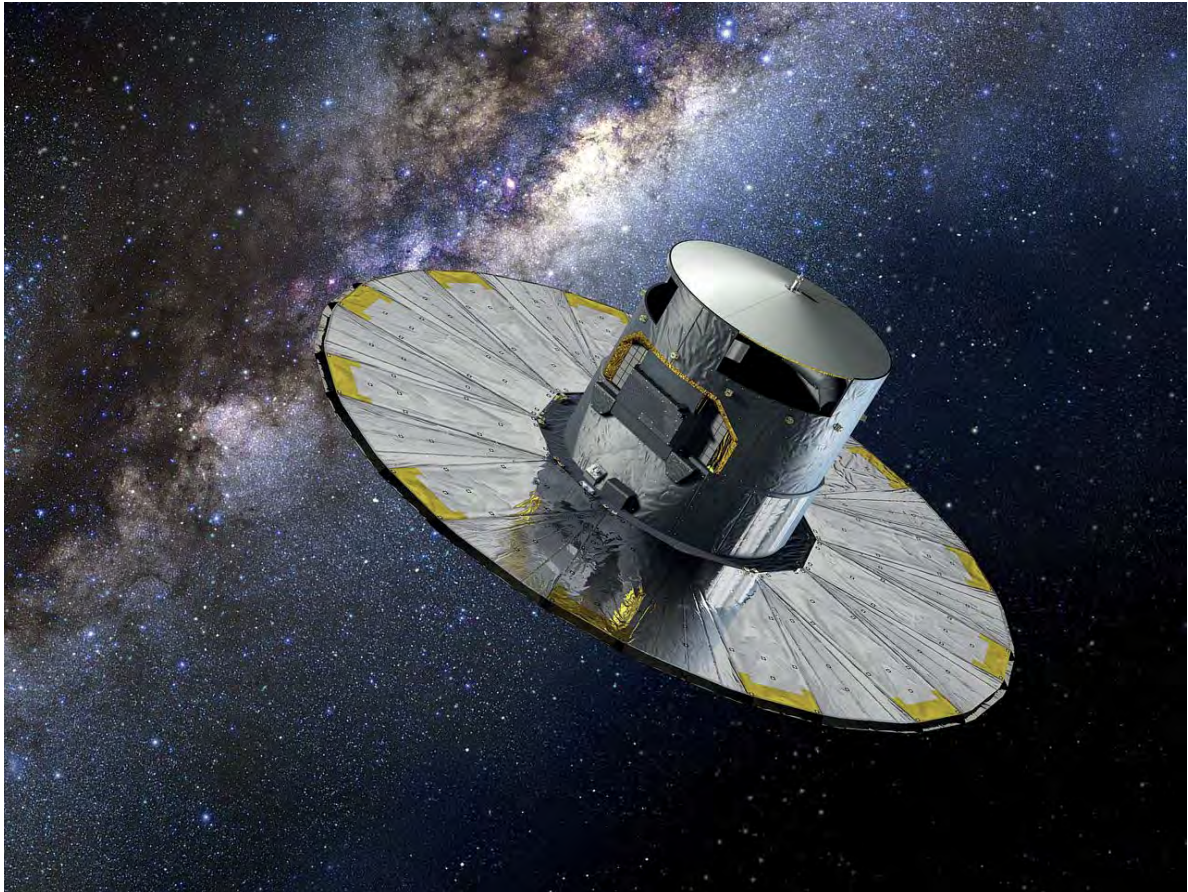
*Рис. 10. Геннадий Владимирович Борисов.  
Источник: <https://ru.wikipedia.org/>*

Крымской лаборатории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, Борисов проводит наблюдения в нерабочее время на телескопах собственной разработки. В момент открытия объект находился на расстоянии около 3 а.е. от Солнца, звёздная величина составляла  $17,8^m$ . После нескольких наблюдений кометы было установлено, что она движется по гиперболической орбите, то есть пришла из-за пределов Солнечной системы. 12 сентября 2019 года Центр малых планет выпустил циркуляр об открытии первой межзвёздной кометы C/2019 Q4, которой было дано название «комета Борисова» (2I/Borisov) в честь её первооткрывателя.

## Астрометрический спутник Gaia и его работа

Одним из важнейших событий последних лет для астрономии стал запуск Европейским космическим агентством астрометрического спутника Gaia. Задачей этой космической обсерватории стало измерение скоростей и параллаксов звёзд нашей Галактики. Подобные обсерватории раньше уже запускались в космос, но особая важность запуска Gaia определяется исключительной точностью измерений — определение положения звёзд ярче  $15^m$  выполняется с точностью выше 25-ти миллионной доли угловой секунды. Также большой отрыв по сравнению с предыдущими измерениями достигнут, благодаря огромному количеству исследованных звёзд — за время работы спутником были проведены астрометрические наблюдения более миллиарда небесных светил.

Gaia был запущен 19 декабря 2013 года российской ракетой-носителем «Союз» в сочетании с разгонным блоком «Фрегат». 8 января 2014 года аппарат успешно достиг своей целевой орбиты вокруг точки Лагранжа  $L_2$ . С тех пор каждый выпуск данных наблюдений обсерватории становился собы-



*Рис. 11. Обсерватория Gaia.  
Источник: [www.nplusr.ru](http://www.nplusr.ru)*

тием в мире астрономии: 1-ый релиз данных — 14 сентября 2016 года (яркость 1,1 миллиарда и параметры движения 2 миллионов звёзд); 2-ой релиз данных — 25 апреля 2018 года (данные движения более 1,7 миллиарда звёзд); 3-ий ранний релиз — данные по 1,8 миллиарду звёзд. На 2022 год намечен выпуск полного 3-го релиза Gaia.

Благодаря работе обсерватории, учёным удалось построить самую точную трёхмерную карту нашей Галактики, включающую более миллиарда звёзд. На основе данных Gaia были открыты подструктуры Млечного Пути, вызванные гравитационным возмущением из-за недавнего столкновения с другой галактикой; обнаружены звёзды, которые прилетели в нашу Галактику из межгалактического пространства; открыт ещё один спутник Млечного Пути — галактика

Насос 2; обнаружена «волна Рэдклиффа» — мощный поток из газа и новорождённых звёзд; открыто более 40 карликовых галактик, движущихся с аномально большими скоростями, что, по всей видимости, свидетельствует об их недавнем сильном взаимодействии с нашей Галактикой. В настоящее время (2022 год) обсерватория Gaia продолжает свою работу.

## «Фотография» чёрной дыры

10 апреля 2019 года миру была представлена первая «фотография» чёрной дыры. Это стало настоящей сенсацией, как для научного сообщества, так и для широкой публики. Наконец, стало возможным увидеть не фантазию художников, а реалистичный снимок гипотетического объекта. Конечно, фотографией в прямом смысле это изображение считать нельзя хотя бы потому, что термин «фотография» происходит от древне-греческих слов "фотос" — свет и "графо" — пишу (т.е. светопись, получение изображения при помощи видимого излучения). А в данном случае астрономы использовали информацию, полученную не с помощью оптических инструментов, а радиотелескопов.

Изображение чёрной дыры стало результатом двухлетней работы команды Телескопа горизонта событий (Event Horizon Telescope, ЕНТ). В действительности, это целых восемь обсерваторий, расположенных в разных частях земного шара. «Виртуальный» телескоп следил за одним объектом — сверхмассивной черной дырой в центре галактики М87, которая находится в созвездии Девы и удалена от Земли на расстояние около 55 миллионов световых лет. В период с 5 по 11 апреля 2017 года ЕНТ наблюдал М87 на длине волны 1,3 мм. В работе участвовали: ALMA, АРЕХ (Чили), 30-метровый телескоп IRAM (Испания), телескоп Джеймса Клерка Максвелла JCMT и Субмиллиметровая решётка SMA (Гавайи),



*Рис. 12. Директор проекта «Телескоп горизонта событий» Шеперд Доулман представляет первое изображение черной дыры. 10 апреля 2019 года.*

*Источник: Pete Marovich / EPA / Scanpix / LETA*

Большой миллиметровый телескоп Альфонсо Серрано (LMT, Мексика), Субмиллиметровый телескоп (SMT, США) и телескоп на Южном полюсе (SPT, Антарктида). Полученные данные были синхронизированы с помощью атомных часов и обработаны с использованием алгоритма визуализации, который создала Кэтрин Боуман. Это позволило получить изображение с чрезвычайно высоким угловым разрешением.

Астрономы смогли дать независимую оценку массы чёрной дыры галактики M87: она тяжелее Солнца в 6,5 миллиардов раз и примерно в 1500 раз тяжелее сверхмассивной черной дыры Sgr A в центре нашей Галактики. В итоге, несмотря на то, что чёрная дыра M87 примерно в 2000 раз дальше от нас, она и примерно во столько же раз массивнее. Это делает наблюдаемый угловой размер её горизонта событий

сравнимым с Sgr A. Радиус Шварцшильда, так называемый «размер» чёрной дыры, оказался равен примерно 120 средним расстояниям от Земли до Солнца.

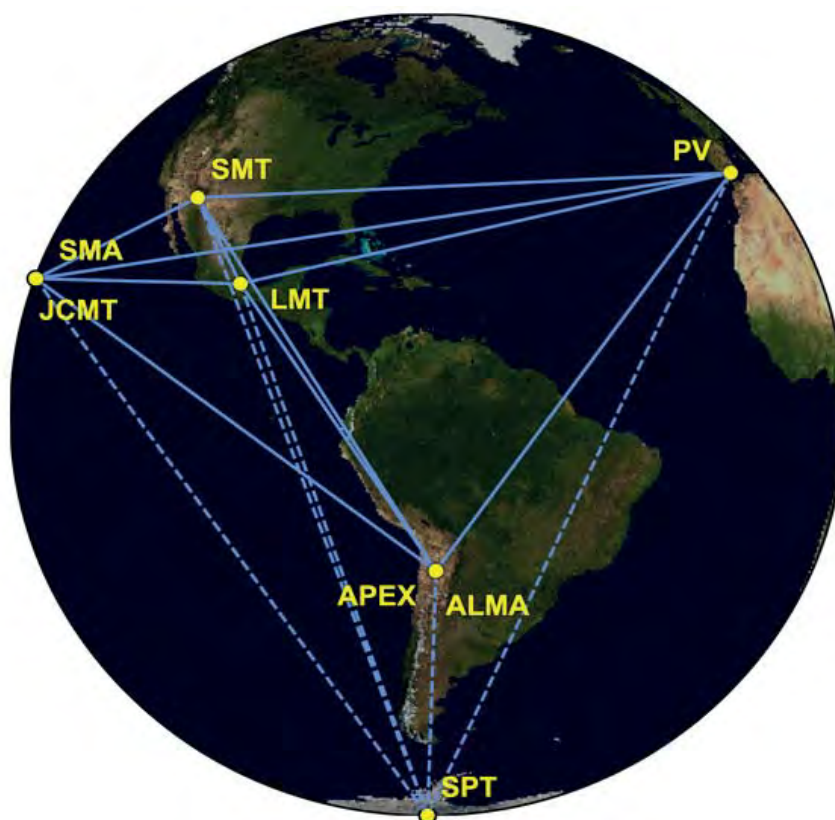
Успех проекта был обусловлен в том числе положением чёрной дыры относительно Земли. Мы видим объект, повёрнутый к нам лицом, а не ребром. Светящийся аккреционный диск на рис. 13 расположен перпендикулярно к лучу зрения – это позволило учёным лучше понять, как устроено течение вещества в окрестностях чёрной дыры, и в очередной раз протестировать Общую теорию относительности. Однако «фото» не стало подтверждением существования чёрных дыр.

Запечатленное на рис. 13 излучение пришло из областей аккреционного диска, удалённых от горизонта событий на несколько гравитационных радиусов. Так что это изображение можно скорее соотнести с фотографией силуэта или тени чёрной дыры. Эта тень представляет собой линзированное изображение фотонной сферы чёрной дыры, и её наличие становится доказательством того, что объект действительно



*Рис. 13. Изображение черной дыры в галактике M87.  
Источник: Event Horizon Telescope Collaboration*

можно считать чёрной дырой. Кроме этого, наблюдаемый диаметр тени на изображении 2019 года совпадает с теоретическими расчётами, известными ранее. Всё это вместе делает возможным считать проект коллаборации Телескопа горизонта событий успешным. Учёным удалось значительно сузить и во многом прояснить понимание деталей процесса аккреции на сверхмассивные чёрные дыры. Но следует помнить, что это только начало пути в вопросе переноса чёрных дыр из разряда гипотетических объектов в реальные. Одна из дальнейших целей ЕНТ – понять, почему, в отличие от других галактик, сверхмассивная чёрная дыра в центре Млечного Пути сравнительно тусклый объект – её яркость всего в несколько сотен раз больше яркости Солнца.



*Рис. 14. Расположение телескопов ЕНТ, участвовавших в наблюдениях в апреле 2017 года: SMA и JCMT – Гавайи, SMT – США, LMT – Мексика, ALMA и APEX – Чили, SPT – Антарктида и PV (IRAM) – Испания. Сплошные линии показывают пары телескопов, следивших за М87, пунктирные – за квазаром 3С 279, который использовали для калибровки измерений. Иллюстрация из статьи в *The Astrophysical Journal Letters*, V. 875, N. 1, CC BY 3.0*



## Экзопланеты. Достижения последних лет

Экзопланетами называют планеты, принадлежащие к иной, не Солнечной планетной системе. Также возможно существование свободных планет, не связанных с конкретной звездой.

Первые подтверждённые экзопланеты были обнаружены А. Вольщаном и Д. Фрэйлом в 1992 г. вокруг радиопульсара PSR B1257+12. Однако экзопланеты были признаны «вторичными», т. е. образовавшимися после вспышки сверхновой. «Настоящая» экзопланета была впервые обнаружена в 1995 г. М. Майором и Д. Кело. Открытие было сделано с помощью спектрометра, способного измерять доплеровское смещение линий с точностью до 13 м/с. Майор и Кело обнаружили «покачивания» звезды 51 Пегаса (51 Peg) с периодом 4,23 сут., вызванные влиянием планеты, по массе близкой к Юпитеру. Планеты подобного типа называют «горячими юпитерами». Это стало первым подтверждённым открытием экзопланеты у звезды главной последовательности. В 2019 году учёные получили Нобелевскую премию за свою работу.

К концу XX — началу XXI вв. рост числа открытых экзопланет ускорился. К марту 2021 г. было известно около 4700 экзопланет. Поначалу большинство из них открывались доплеровским методом — по периодическому изменению лучевой скорости звезды, но вскоре лидером стал фотометрический метод прохождений, или транзитов, позволяющий заметить планету по эффекту «микрозатмения» собственной звезды. Также существуют другие методы обнаружения экзопланет. Среди них — прямая регистрация изображений и метод гравитационного микролинзирования.

В 2016 г. методом радиальных скоростей была открыта экзопланета, вращающаяся вокруг красного карлика, звезды Проксима Центавра, входящего в тройную звёздную систему Альфа Центавра. На данный момент эта экзопланета считается ближайшей к Земле. Также она является ближайшей

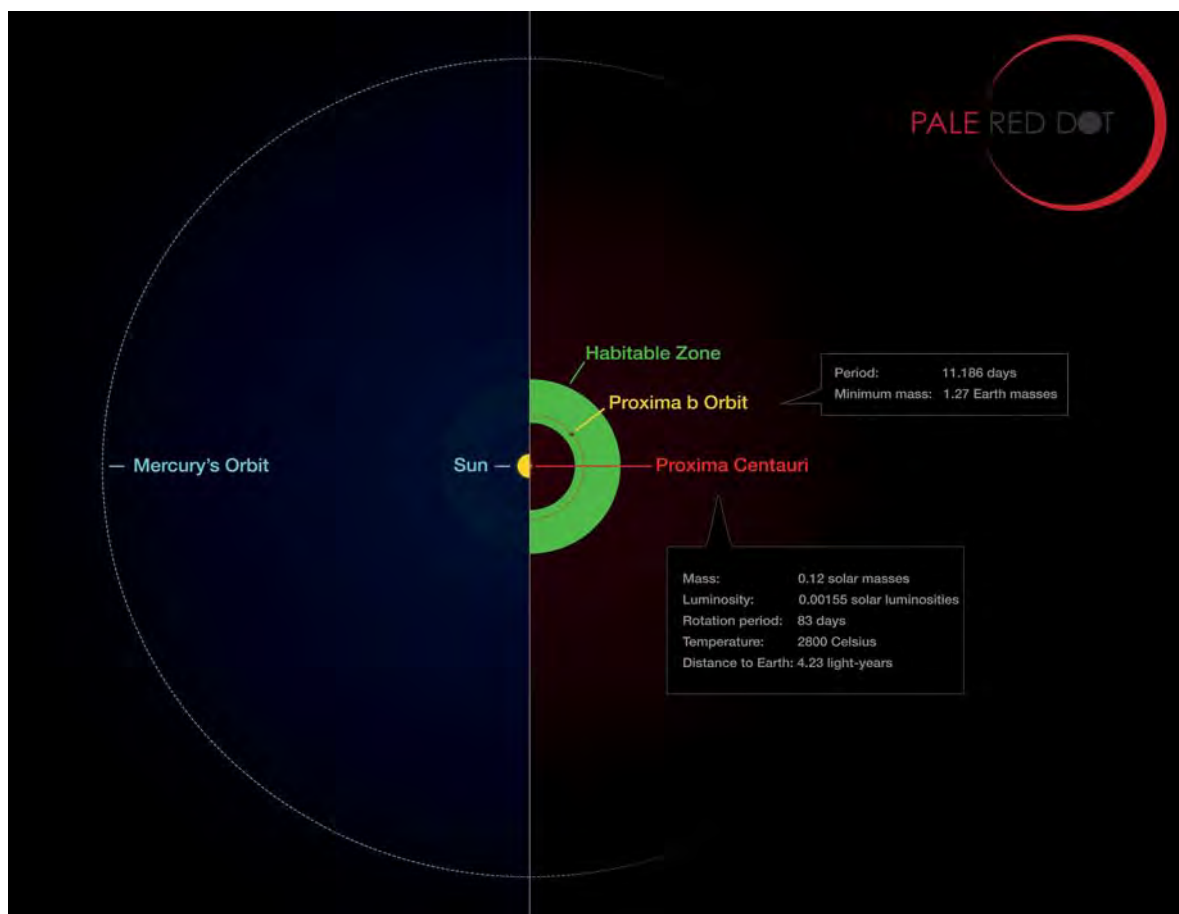
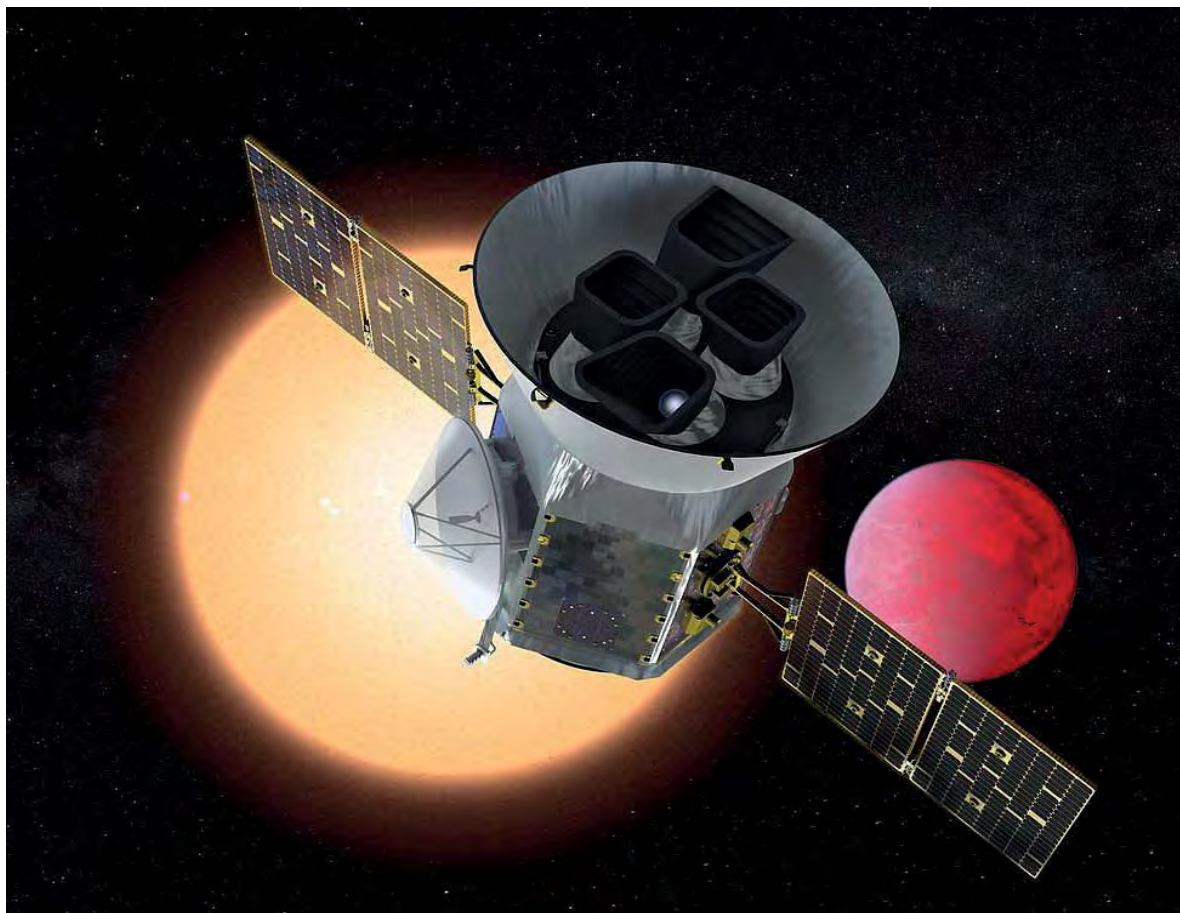


Рис. 15. Сравнение орбиты планеты, вращающейся вокруг Проксимы Центавра, с той же областью Солнечной системы.  
 Источник: <https://www.eso.org/public/images/eso1629c/>

экзопланетой, находящейся в зоне обитаемости. Она вращается на расстоянии около 7,3 млн км (0,05 а.е.) от Проксимы Центавра с орбитальным периодом около 11,2 земных суток.

В 2009 г. для поиска внесолнечных планет была запущена космическая обсерватория «Кеплер». За 9 лет работы с её помощью были зарегистрированы свыше 4700 кандидатов в экзопланеты, из которых около 1000 впоследствии удалось подтвердить. «Кеплер» прекратил свою работу в 2018 году. Он был отключен 15 ноября – в дату смерти Иоганна Кеплера, в честь которого был назван.

В том же 2018 г. на смену «Кеплеру» был запущен космический телескоп TESS, предназначенный для поиска



*Рис. 16. Спутник TESS в представлении художника.  
Источник: <https://www.nasa.gov/image-feature/tess>*

экзопланет транзитным методом. Основная цель миссии состояла в нахождении каменных экзопланет, попадающих в обитаемую зону и удалённых от Земли не более, чем на 200 световых лет.

В январе 2020 г. с помощью телескопа TESS была открыта землеподобная планета у красного карлика TOI-700 в созвездии Золотой Рыбы, потенциально пригодная для жизни и удалённая от Земли на 100 световых лет. В сентябре того же года было получено сообщение об открытии газового гиганта диаметром с Юпитер, вращающегося вокруг белого карлика WD 1856+534 в 80 световых годах от Земли.

За два года работы телескоп TESS обнаружил более 2100 внесолнечных планет, которые пока числятся в статусе кан-

дидатов, и 66 экзопланет, существование которых уже подтверждено независимыми наблюдениями. Планировалось, что TESS будет вести работу с 2018 по 2020 гг., однако в прошлом году проект был переведен в фазу расширенной миссии, которая продлится до сентября 2022 года. Возможно, вскоре мы услышим о новых экзопланетах, которые будут напоминать наш земной мир и, может быть, подходить для жизни.

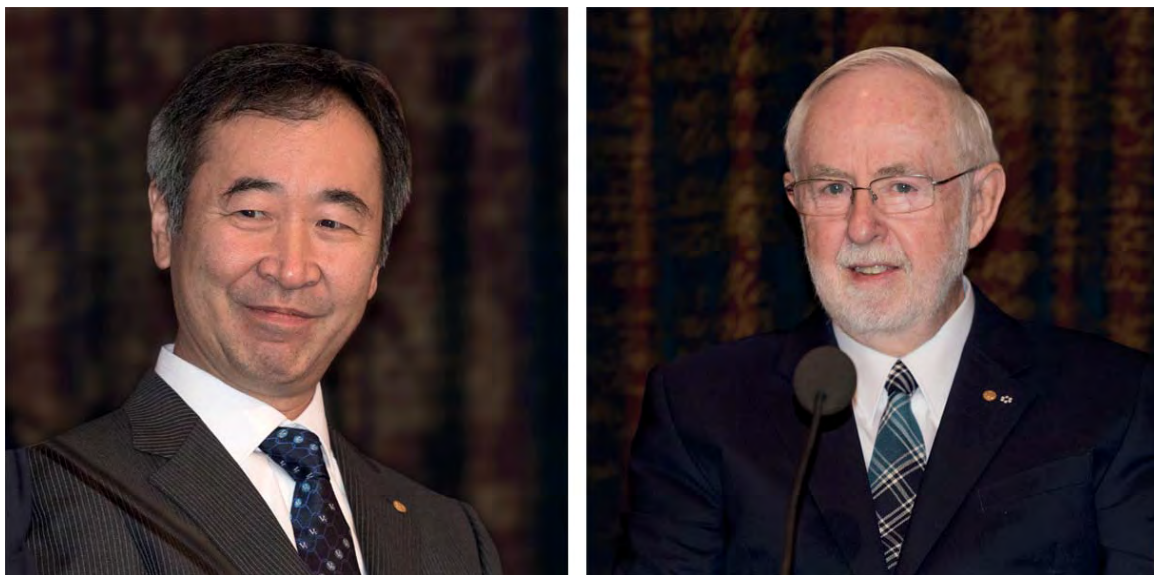
## Нобелевские лауреаты последних лет, связанные с астрономией

2011 год. Нобелевская премия по физике «За открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых»: Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт, Адам Рисс.



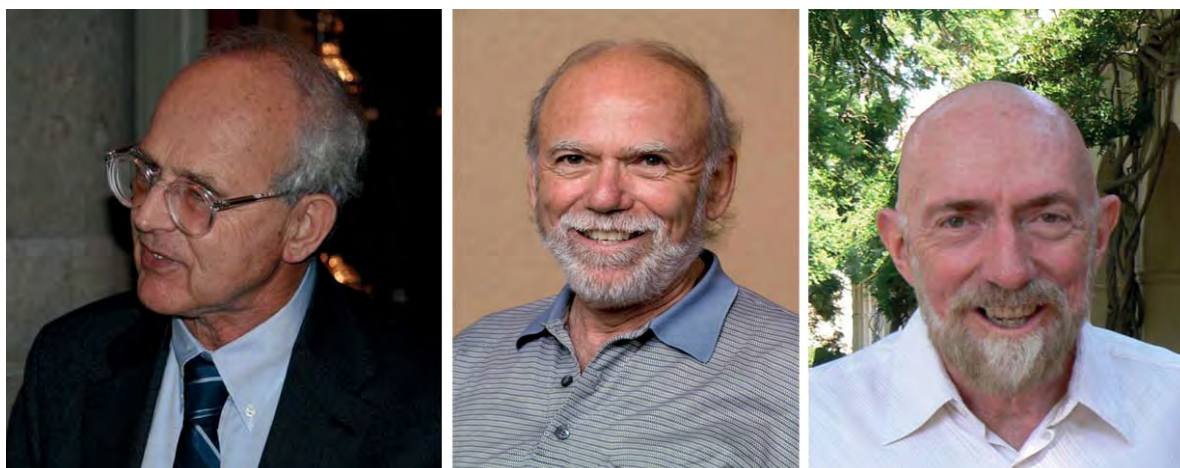
*Рис. 17. Слева направо: Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт, Адам Рисс*

2015 год. Нобелевская премия по физике «За открытие нейтринных осцилляций, показывающее, что нейтрино имеют массу»: Такааки Кадзита, Артур Макдональд.



*Рис. 18. Слева направо: Такааки Кадзита, Артур Макдональд*

2017 год. Нобелевская премия по физике «За решающий вклад в детектор LIGO и наблюдение гравитационных волн»: Рейнер Вайс, Барри Бэриш, Кип Торн.



*Рис. 19. Слева направо: Рейнер Вайс, Барри Бэриш, Кип Торн*

2019 год. Нобелевская премия по физике «За теоретические исследования в физической космологии»: Джим Пиблс. «За открытие экзопланеты на орбите солнцеподобной звезды»: Мишель Майор, Дидье Кело.



*Рис. 20. Слева направо: Джим Пиблс, Мишель Майор, Дидье Кело*

2020 год. Нобелевская премия по физике «За открытие того, что образование чёрных дыр с необходимостью следует из общей теории относительности»: Роджер Пенроуз. «За открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей галактики»: Райнхард Генцель, Андреа Гез.



*Рис. 21. Слева направо: Роджер Пенроуз, Райнхард Генцель, Андреа Гез*

# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. В.Г. Сурдин. Понятный космос: от кварка до квазара. — М.: АСТ, 2021 г.
2. Астрономия. История, теории и практики / под ред. М.Ю. Шевченко. — М.: АСТ, 2021 г.
3. Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016) — Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/LIGO>
5. <https://sci.esa.int/web/gaia>
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Gaia>
7. [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433589/Astrofizicheskie\\_itogi\\_2019\\_goda](https://elementy.ru/novosti_nauki/433589/Astrofizicheskie_itogi_2019_goda)
8. [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433818/Chernaya\\_dyra\\_galaktiki\\_M87\\_novye\\_shtrikhi\\_k\\_portretu](https://elementy.ru/novosti_nauki/433818/Chernaya_dyra_galaktiki_M87_novye_shtrikhi_k_portretu)
9. [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/433463/Chernaya\\_dyra\\_galaktiki\\_M87\\_portret\\_v\\_interere](https://elementy.ru/novosti_nauki/433463/Chernaya_dyra_galaktiki_M87_portret_v_interere)
10. [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/434867/Izobrazhenie\\_chyornoy\\_dyry\\_что\\_на\\_samom\\_dele\\_poluchili\\_astronomy](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434867/Izobrazhenie_chyornoy_dyry_что_на_samom_dele_poluchili_astronomy)
11. <https://eso.org/public/news/eso1629/>
12. <https://naked-science.ru/article/astronomy/obnaruzhena-pervaya-planeta-u-belogo-karlika>
13. [https://www.forbes.ru/tehnologii/406965-dve-tysyachi-novyh-mirov-что\\_открыла\\_kosmicheskaya\\_observatoriya-tess](https://www.forbes.ru/tehnologii/406965-dve-tysyachi-novyh-mirov-что_открыла_kosmicheskaya_observatoriya-tess)

# РАННИЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ

**Т.М. Ситнова,**

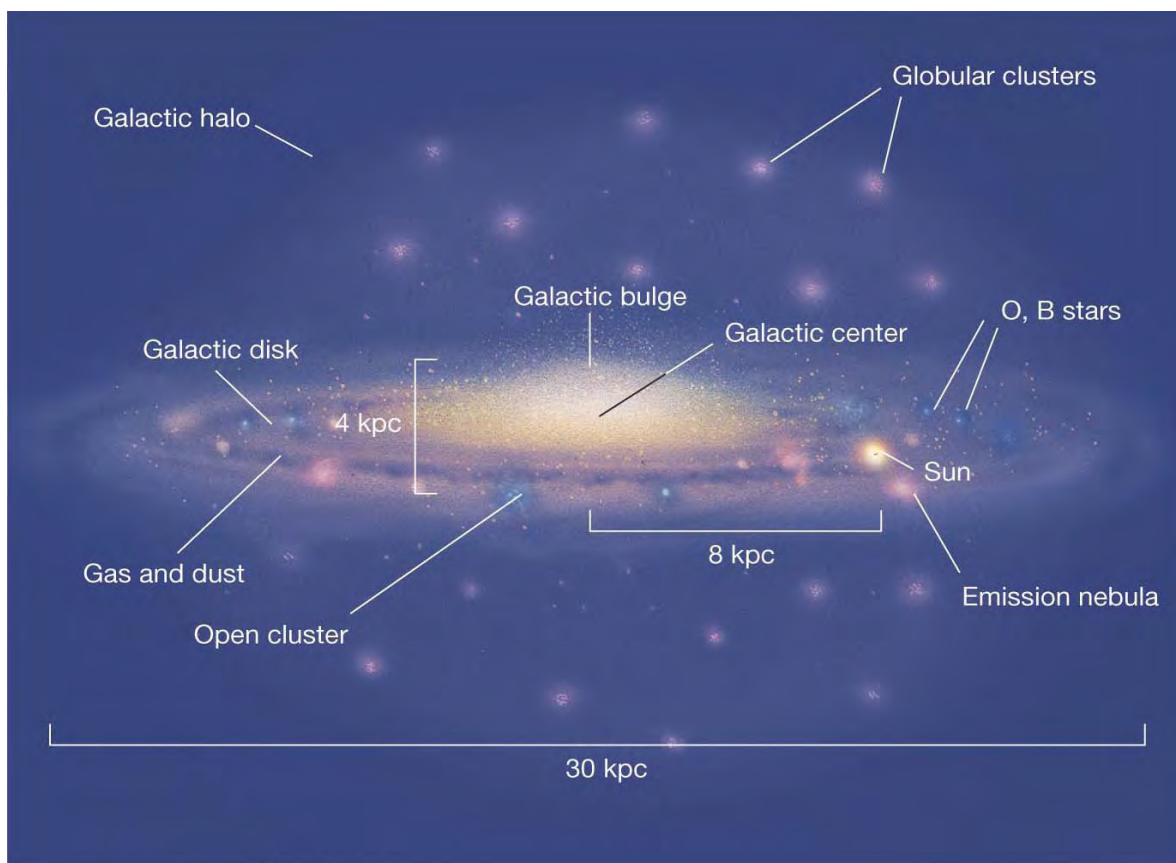
*кандидат физико-математических наук,  
Отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии  
Институт астрономии Российской академии наук*

Одна из задач астрофизики, да и науки в целом, — понять и объяснить почему наблюдаемые объекты именно такие, как они возникли, какими были раньше, как они меняются со временем, какие законы ими управляют и какое место они занимают в физической картине мира. В этой статье мы рассмотрим нашу галактику Млечный Путь и постараемся дать ответы на перечисленные вопросы в той мере, в которой позволяют современные данные. Как и всегда, под словом Галактика, написанным с прописной буквы, мы подразумеваем нашу собственную галактику — Млечный Путь.

Для понимания эволюции галактик важно учитывать взаимосвязь процессов, которые происходят на разных масштабах, от производства химических элементов внутри звезд путём слияния ядер более лёгких элементов, до слияния целых галактик и даже их скоплений.

Наша Галактика — огромная система, которая содержит в себе множество звёздных подсистем (тонкий диск, толстый





Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Рис. 1. Строение Галактики

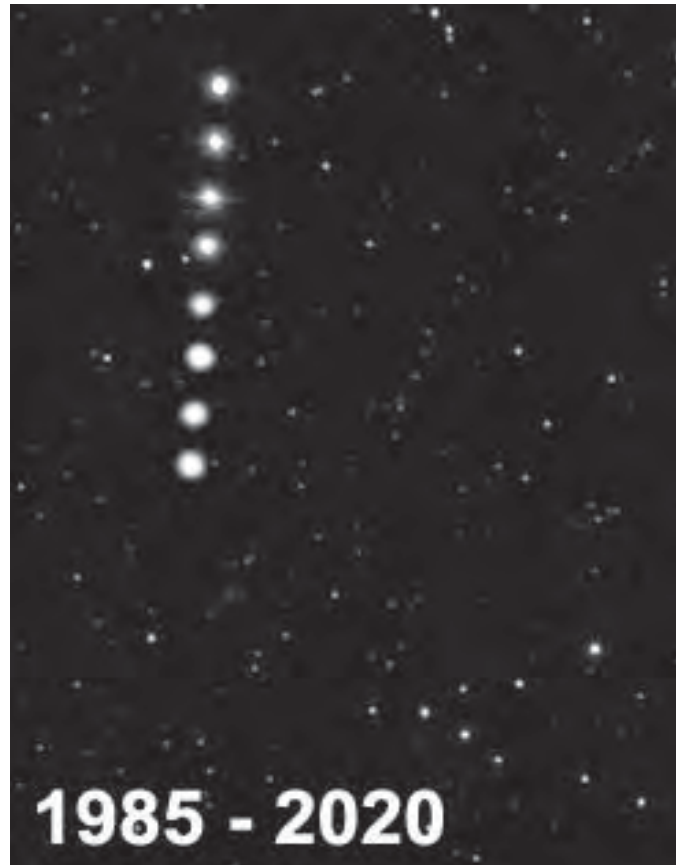
диск, балдж, бар, гало, шаровые и рассеянные звёздные скопления, звёздные потоки, карликовые галактики-спутники), а также газ, из которого и сейчас в тонком диске продолжают рождаться звёзды.

Газ можно представить себе как своеобразную галактическую “валюту” (от лат. *valere*, «быть сильным, иметь возможность, стоять») — материал, необходимый для формирования новых звёзд и производства различных химических элементов в результате их эволюции. Иными словами, если в галактике есть газ, то может идти процесс звездообразования и химической эволюции. Газ может выметаться из систем под действием внутренних процессов (например, взрывов сверхновых), а также из-за приливного взаимодействия с другими галактиками. Например, при сближении с Млечным Путём карликовые галактики теряют газ и звёзды в процессе

разрушения приливными силами. Впоследствии из этого захваченного газа в Млечном Пути могут снова сформироваться новые звёзды, которые в конце жизни обогатят среду тяжёлыми элементами (в астрономии все элементы, кроме водорода и гелия, принято называть тяжёлыми элементами или металлами). Из этого обогащённого металлами газа снова могут сформироваться звёзды. Так происходит круговорот газа в Галактике, химическая и динамическая эволюция разных её подсистем. Важно учитывать, что эти процессы неразрывно связаны друг с другом.

Наша Галактика не всегда была такой, какой мы её видим сейчас. По современным оценкам в галактике содержится порядка  $10^{11}$  звёзд. За время её жизни (13.6 миллиардов лет) в ней произошло много событий: она успела поглотить десятки своих карликовых галактик-спутников; множество поколений звёзд обогатили среду тяжёлыми элементами; в разных её подсистемах звездообразование то вспыхивало, то останавливалось. Астрофизики пытаются распутать этот клубок и восстановить ход событий в Галактике от начальных этапов до настоящего времени.

В древности звёздное небо представляли как сферу, на которой звёзды занимали неизменные положения, и лишь Солнце, Луна и блуждающие планеты перемещались по ней. Однако наблюдаемые вспышки новых и сверхновых звёзд породили сомнения в неизменности объектов на небесной сфере, и ещё до нашей эры были созданы первые звёздные каталоги с указанием их координат и блеска. Некоторые из ближайших к Солнцу звёзд движутся в Галактике так быстро, что за несколько лет могут заметно изменить своё положение на небе относительно более далёких и почти неподвижных с точки зрения земного наблюдателя звёзд. Самая быстрая из них — “летающая” звезда Барнарда, названная в честь астронома, который впервые в 1916 году измерил её скорость в картинной плоскости (собственное движение). Эта звезда проходит за год расстояние в 10 угловых секунд. За 180 лет

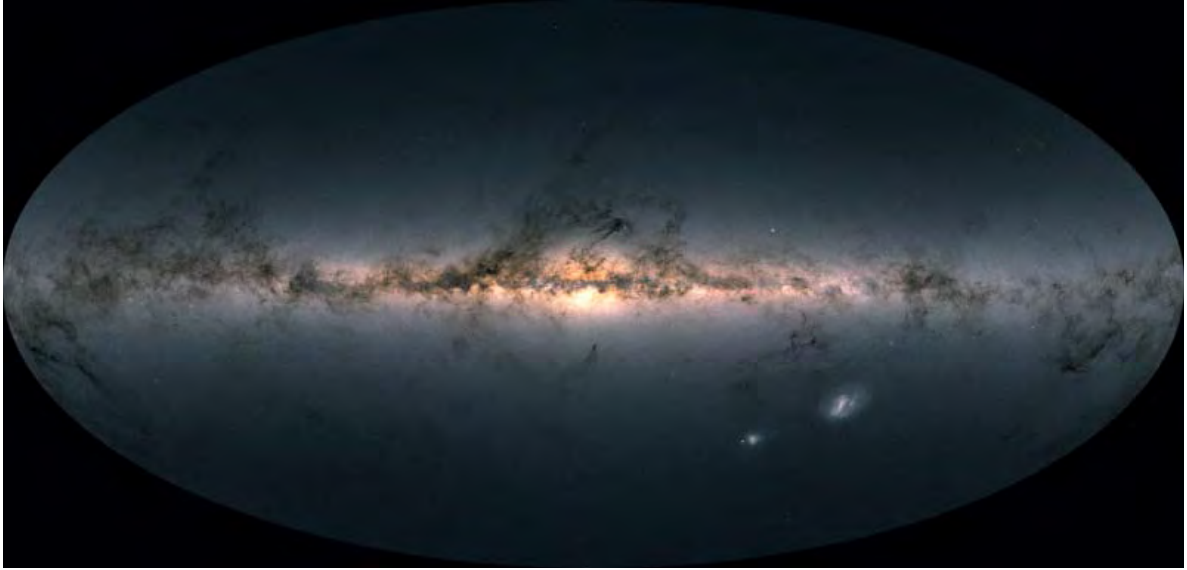


*Рис. 2. Положение звезды Барнарда в разные годы.  
Снимки сделаны с интервалом в 5 лет.  
Источник: <https://my.hwy.com.au/sjquirk/misc.html>*

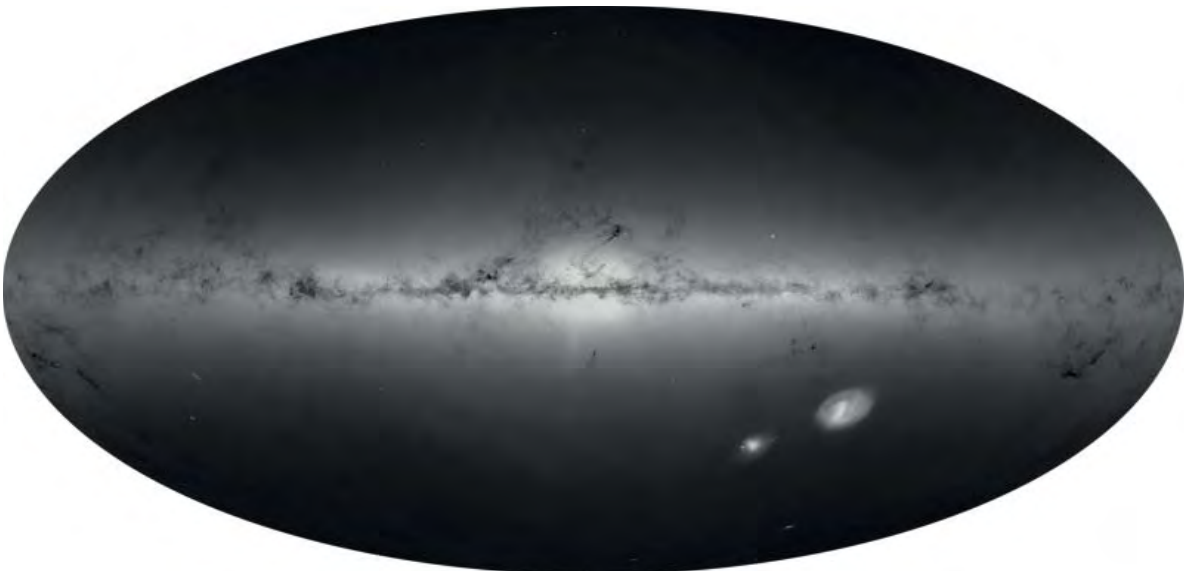
она пройдёт путь, равный угловому диаметру Луны (или Солнца), а угловое расстояние между Мицаром и Алькором (звёзды созвездия Большая Медведица) — всего за 70 лет.

Эта рекордно быстро движущаяся звезда была далеко не первой, для которой было измерено собственное движение. За 200 лет до открытия Барнарда Галлей обнаружил собственное движение Альдебарана, Арктура и Сириуса, сопоставив наблюдаемые координаты с теми, что приведены в каталоге Гиппарха, составленном больше, чем за сто лет до нашей эры.

Благодаря запуску космических астрометрических обсерваторий (Hipparcos запущен в 1989, Gaia — в 2013) получены точные координаты, расстояния (параллаксы) и скорости (собственное движение и скорость вдоль луча зрения) для



а)



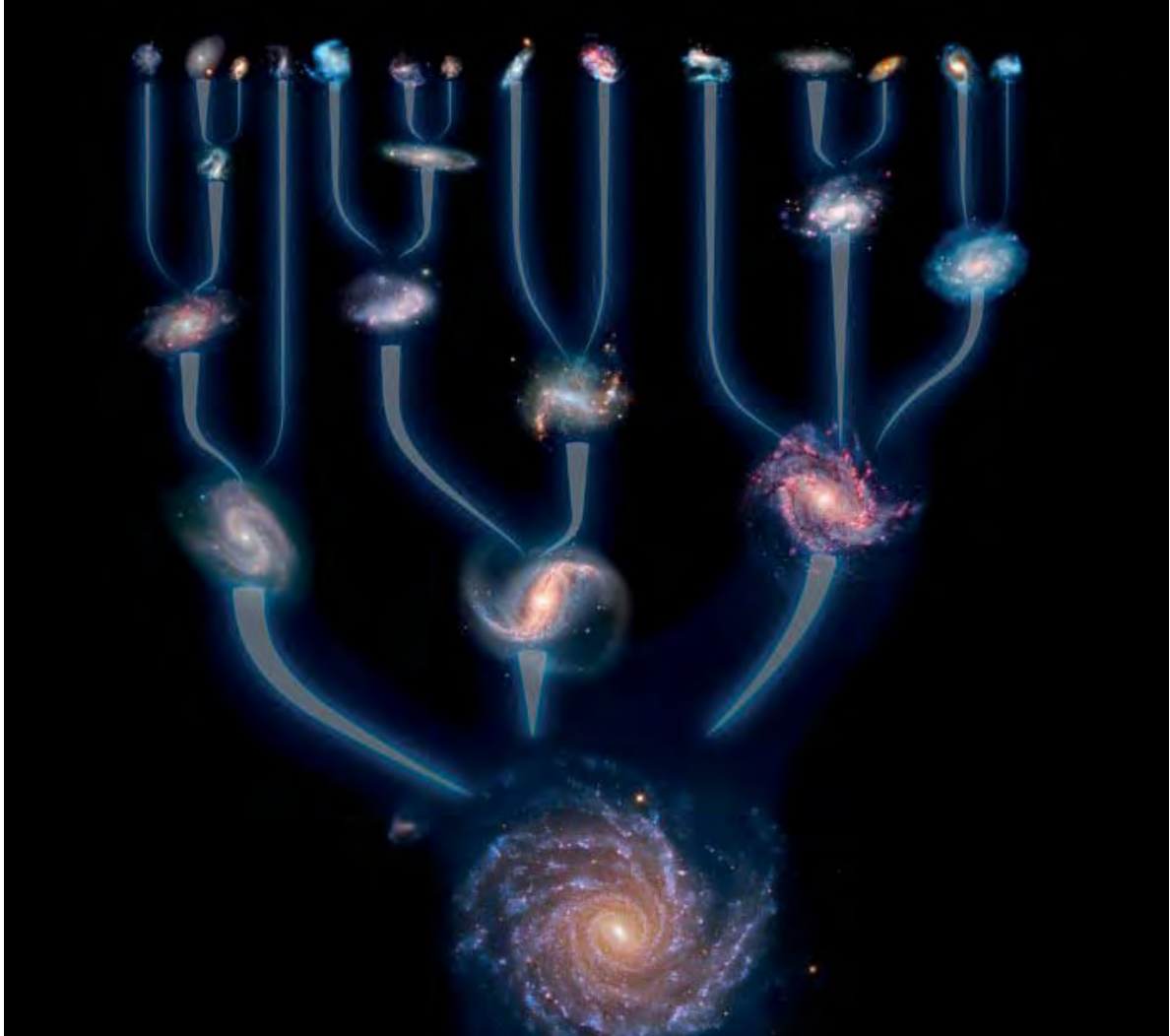
б)

*Рис. 3. а) Карта Галактики, построенная по фотометрии и координатам по данным Gaia. б) Карта плотности звёзд в Галактике по данным Gaia. Некоторые звёздные потоки, шаровые скопления и карликовые галактики выделяются на фоне гало как более яркие области.  
Источник: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration](https://www.esa.int/Science_Exploration)*

миллиарда звёзд Галактики и её окрестностей. Это привело к открытию новых динамически связанных подсистем (карликовых галактик, звёздных скоплений и потоков).

Было установлено, что половина звёзд поля, которые сейчас находятся в гало, раньше принадлежала карликовым галактикам. Многие звёздные системы (карликовые галактики разных типов и шаровые скопления) сейчас наблюдаются на промежуточных стадиях своего разрушения как звёздные потоки. Данные о положениях, скоростях и химическом составе их звёзд говорят о неоднородности этих структур, что может быть вызвано образованием этих подсистем путём слияния ещё меньших.

Эти результаты согласуются с современными космологическими представлениями об иерархической модели, когда крупные системы формируются в результате слияния более мелких. Согласно этим представлениям, такие галактики, как наша сформировались из небольших звёздных систем с массами от миллионов до десятков миллиардов солнечных масс, которые сами могли образоваться в результате слияния ещё более мелких систем. В будущем процесс объединения продолжится. Наша Галактика и её ближайшая массивная соседка — спиральная галактика в созвездии Андромеды (М31, она же “туманность” Андромеды) вместе составляют основу местной группы, в которую помимо этой пары входят и более мелкие карликовые галактики. Расстояние до Андромеды составляет 800 килопарсек. Внутри такой небольшой по вселенским масштабам системы галактики гравитационно связаны и не удаляются друг от друга из-за расширения Вселенной, а наоборот, приближаются. Согласно современным представлениям, через 4.5 миллиарда лет они сольются в единую эллиптическую галактику Млечномёда. После чего Млечномёда сольётся с галактиками из скопления Девы. А затем и эта система объединится с подобными ей из сверхскопления Шепли. Иерархическая структура подобна дереву, где на одной стороне находятся сверхскопления с массами порядка  $10^4$  масс Млечного Пути, а с другой — самые первые и мелкие карликовые галактики, с массами в сотни тысяч раз меньшими, чем масса Галактики.



*Рис. 4. Иерархическая модель формирования более крупной галактики из мелких.*

*Источник: [https://www.eso.org/public/spain/images/1016-galaxy\\_formation\\_merger/?lang](https://www.eso.org/public/spain/images/1016-galaxy_formation_merger/?lang)*

Такие карликовые галактики называют иногда “кирпичиками”, поскольку они, вероятно, послужили начальным строительным материалом для всех остальных галактик.

Вопрос о том, могли ли некоторые из них сохраниться до наших дней, всё ещё открыт. Наиболее подходящие кандидаты на эту роль — карликовые галактики с ультранизкой поверхностной яркостью, открытые в 2006 году. Некоторые из них так малы, что количество звёзд в них исчисляется тысячами. Большинство из них имеет массу порядка милли-

она солнечных масс, что близко к массам шаровых скоплений. Однако в отличие от шаровых скоплений, где звёзды чрезвычайно плотно располагаются, у этих галактик звёзды расположены очень разреженно. Например, в карликовой галактике в созвездии Тукан некоторые звёзды удалены от центра родительской галактики на расстояние девяти эффективных радиусов (радиус окружности, из которого приходит половина всего света от галактики). Посмотрев на снимок области неба, на котором находится одна из таких галактик, иногда сложно даже заподозрить там её присутствие.

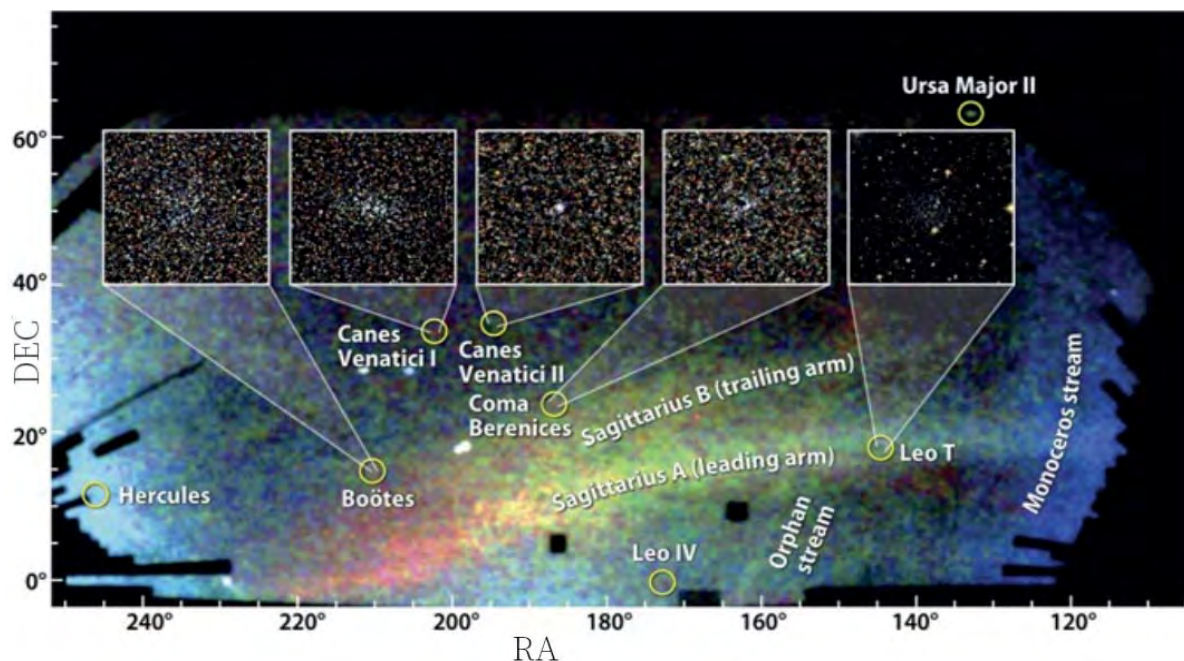


Рис. 5. Карта плотности звёзд с обозначением некоторых подсистем. На врезках показаны снимки обозначенных карликовых галактик. Источник: Belokurov et al., *The Field of Streams: Sagittarius and Its Siblings*, *The Astrophysical Journal*, Volume 642, Issue 2, pp. L137-L140, 2006

Если более крупные карликовые галактики выделяются на фоне как более густонаселённые области и могут быть обнаружены методом звёздных подсчётов, то для обнаружения галактик с ультранизкой поверхностной яркостью нужны данные о скоростях звёзд. Обработав огромные массивы

данных о положениях и скоростях звёзд, можно обнаружить группы звёзд, которые движутся с близкими скоростями, а значит, они гравитационно связаны. Такой поиск напоминает работу золотоискателя, где нужно промыть горы песка, чтобы найти крупинку драгоценного металла. Но как же так получается, что при массах, сопоставимых с массами шаровых скоплений, в карликовых галактиках звёзды могут находиться так разреженно, но при этом удерживаются вместе? Дело в том, что одна из составляющих галактик — это загадочная тёмная материя, природа которой остаётся неясной. Тёмная материя проявляет себя гравитационно, но её нельзя наблюдать напрямую доступными нам методами. В карликовых галактиках с ультранизкой поверхностной яркостью её доля относительно звёздной массы максимальная по сравнению с другими типами галактик, в то время как в шаровых скоплениях темная материя отсутствует. Эти факты придают карликовым галактикам ещё большую загадочность и интерес для дальнейших исследований. Поскольку такие галактики образовались первыми, то в них должны находиться самые старые звёзды.

Какими же были самые первые звёзды? Сохранились ли они до наших дней? В отличие от первых карликовых галактик, некоторые из которых, возможно, сохранились до наших дней, самые первые звёзды Галактики не дожили до нашего времени. Эти звёзды состояли только из водорода, гелия и небольшой примеси лития, бериллия и бора — первичных элементов, образовавшихся в результате Большого Взрыва, а не в ходе звёздной эволюции. Облака газа, где нет тяжёлых элементов, не могут эффективно охлаждаться и фрагментироваться на маленькие части при формировании звёзд. Поэтому все первые звёзды были массивными, с массами около 100 солнечных масс.

Чем больше масса звезды, тем меньше она живёт. Звёзды с массой 10 масс Солнца живут десятки миллионов лет, в то время, как звезды с массой меньше солнечной медлен-



нее расходуют свое топливо и больше 10 миллиардов лет сохраняются почти неизменными. Из анализа химического состава маломассивных долгоживущих звёзд можно узнать о химическом составе среды на момент их формирования. Таким образом, определяя химический состав звёзд разных возрастов, можно проследить, как менялось содержание тяжёлых элементов в разных подсистемах Галактики.

Определить химический состав звёзд можно из их спектра. Для этого нужно разложить поток света на составляющие и отдельно зарегистрировать, сколько энергии приходит на разных длинах волн. Это можно сделать, пропустив свет через призму или дифракционную решетку. Наблюдения спектра Солнца с помощью призмы впервые были проведены Ньютоном. Позднее, в начале 19 века, химик Волластон

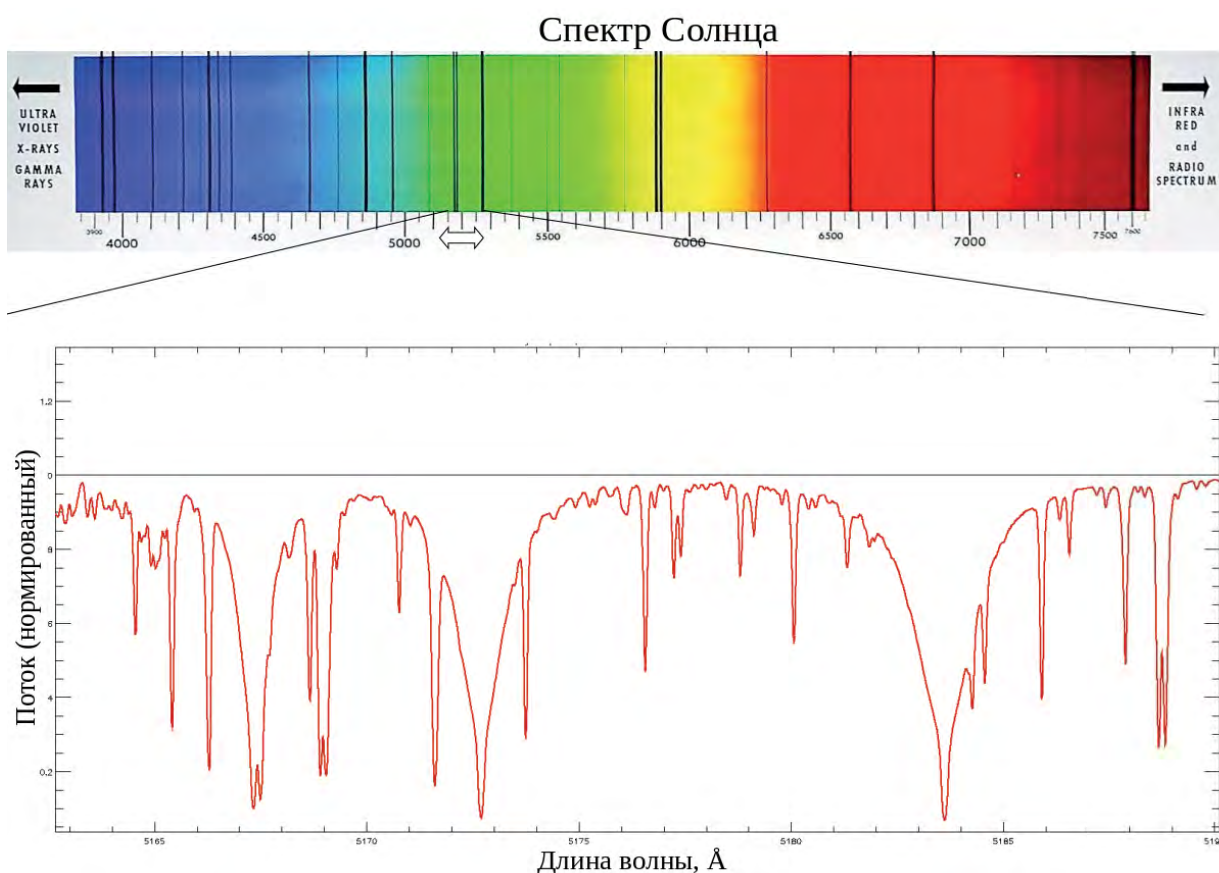


Рис. 6. Спектр Солнца. Диапазон спектра вблизи линий нейтрального магния показан с большим разрешением, данные R. Kurucz 1984

обнаружил в солнечном спектре тёмные линии, Фраунгофер подробно их описал, а Кирхгоф и Бунзен объяснили, что эти линии образуются при поглощении света атомами и ионами разных химических элементов. С той поры зародилась звёздная спектроскопия, которая даёт информацию о химическом составе и физических условиях в звёздных атмосферах.

Сейчас известно 118 химических элементов, причём 24 из них были произведены искусственно, а другие — в результате эволюции звёзд (кроме первичных). Химические элементы отличаются друг от друга разным количеством протонов в ядре. Если посмотреть на распространённость элементов в солнечной системе, то можно отметить, что наибольшая доля приходится на водород и гелий, а все остальные элементы составляют всего два процента по массе.

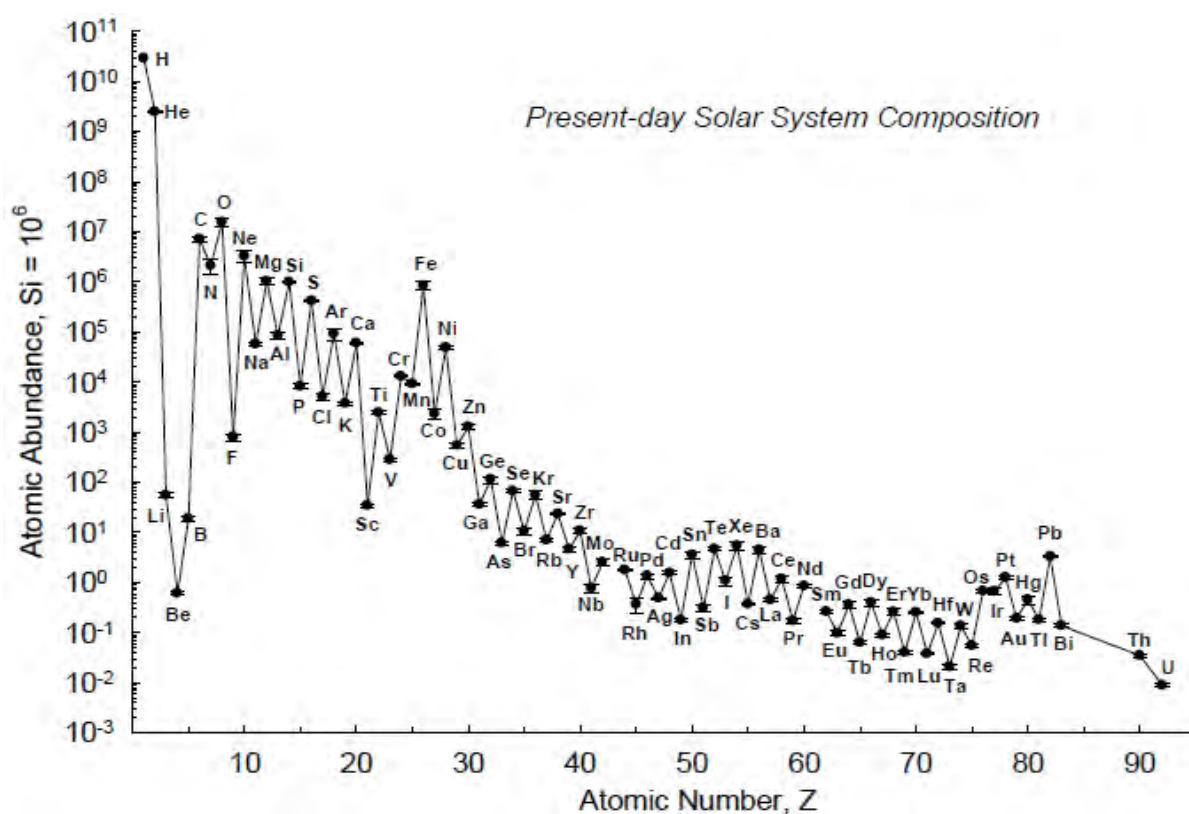


Рис. 7. Кривая распространённости химических элементов в солнечной системе. Источник: Lodders et al., *Abundances of the Elements in the Solar System*, *Solar System, Landolt-Börnstein - Group VI Astronomy and Astrophysics, Volume 4B*. ISBN 978-3-540-88054-7. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, p. 712, 2009

Чем тяжелее элемент, тем, как правило, труднее его произвести, и тем меньше его распространённость. Ещё одна особенность, которая бросается в глаза при взгляде на рисунок, — это большая распространённость элементов с чётным зарядом ядра по сравнению с соседними, нечётными элементами, что делает кривую похожей на пилу. Это вызвано тем, что ядра с чётным зарядом более стабильны.

Тяжелые элементы дают важную информацию для понимания процессов, которые происходят в Галактике. Подобно тому, как в ДНК зашифрована информация о происхождении организмов, в химическом составе звёзд также содержится информация обо всех процессах, которые внесли вклад в обогащение среды тяжёлыми элементами к моменту их рождения.

Наше Солнце также содержит в своём химическом составе информацию о тех давних временах. Однако, помимо этого и обо всех других событиях, которые успели произойти за 9 миллиардов лет, до момента его рождения. Чтобы воспроизвести распределение химических элементов, наблюдаемое в Галактике в настоящее время, необходимо восстановить все химические и динамические события, которые успели в ней произойти от момента формирования и до наших дней. Этот клубок событий можно распутать путём исследования более простых с точки зрения химической эволюции систем с меньшим числом звёзд, а именно маломассивных карликовых галактик и некоторых звёздных потоков.

Для некоторых карликовых галактик с ультранизкой поверхностной яркостью количество сверхновых, внёсших основной вклад в обогащение среды тяжёлыми элементами, оценивается десятками. Но среди звёздных потоков могут быть найдены кандидаты с ещё более простой химической эволюцией. Некоторые из них произошли в результате разрушения карликовых галактик, которое случилось около 10 миллиардов лет назад. Их химическая история была оборвана спустя 3.5 миллиарда лет после начала. Такие пото-

ки несут важную информацию о характерном времени, которое требуется для производства разных тяжёлых элементов. Звёзды разных масс эволюционируют с разной скоростью и производят в ходе своей эволюции разные химические элементы. Поэтому зная, что наблюдаемые элементы были произведены за 3.5 миллиарда лет, мы проводим границу по массам звёзд, которые успели внести свой вклад. Например, в таких системах не будет вклада от сверхновых типа Ia, для которых нужен белый карлик, поскольку звезда с небольшой массой не успеет проэволюционировать за это время.

Из анализа химического состава примитивных систем можно сделать вывод о том, как часто происходят явления, ответственные за производство различных химических элементов. Например, такие элементы как магний, кремний, сера, кальций, титан называют альфа-элементами, поскольку они получаются в результате захвата альфа частиц (ядер гелия, которые состоят из двух протонов и двух нейтронов). Такие процессы идут на поздних стадиях эволюции массивных звёзд. В зависимости от начальной массы звезды, её скорости вращения и других характеристик разные альфа-элементы могут производиться с разной эффективностью. Однако, если таких массивных звёзд достаточно много, то в итоге, после того, как они взорвутся, в галактике установится некоторое среднее содержание этих элементов. Интересно, что у большинства карликовых галактик и Млечного Пути эти элементные соотношения совпадают. Из этого следует вывод о том, что в этих системах было одинаковое относительное распределение масс (доля звёзд, которые имеют массу в заданном интервале) для массивных звёзд. Однако, существуют и исключения — самые маленькие карликовые галактики, где наблюдаемые звёзды могут иметь непохожий химический состав даже внутри одной системы. Например, к таким относится карликовая галактика Segue 1, где для шести звёзд детально определён химический состав и получены разные распределения тяжёлых элементов,

причём неоднородности велики, и для некоторых элементов (углерод, альфа элементы) составляют десятки и сотни раз по концентрации относительно железа. Это говорит о неоднородности перемешивания вещества, из которого сформировались наблюдаемые звёзды, а также о небольшом количестве (около десятка на всю галактику) массивных звёзд, которые ответственны за производство наблюдаемых в ней тяжёлых элементов.

При производстве альфа-элементов выделяется энергия, за счёт которой светит звезда. Такие ядерные реакции называются экзотермическими и идут “сами по себе” с выделением энергии. Тоже самое справедливо и для элементов железного пика (хром, марганец, железо, кобальт, никель), хотя их синтез идёт при других условиях. А вот для производства ещё более тяжёлых элементов требуется, наоборот, затратить дополнительную энергию. Это связано с тем, что протонам и нейтронам энергетически выгодно комбинироваться в ядра с наибольшей энергией связи, и максимум этой энергетической выгоды приходится на железо. Производство элементов тяжелее, чем элементы железного пика, идёт путем захвата нейтронов и их дальнейшего преобразования в протоны. Элементы вплоть до полония (заряд ядра  $Z = 84$ ) еще возможно производить путём медленного последовательного захвата нейтронов. Эти реакции идут в звёздах промежуточных масс (2–4 массы Солнца) на заключительных стадиях эволюции. Интересно отметить, что в 1952 году в спектре такой звезды был обнаружен нестабильный технеций — один из элементов, образующихся в реакциях медленных нейтронных захватов. Период полураспада самого стабильного изотопа технеция составляет меньше миллиона лет, что превышает возраст звезды, в которой он впервые был найден. Так впервые было доказано то, что металлы образуются в результате звёздной эволюции.

За полонием следуют нестабильные элементы, которые распадаются прежде, чем будет захвачен следующий ней-

трон. Для производства самых тяжёлых элементов требуются другие условия с большей плотностью потока нейтронов. Такие условия могут достигаться, например, при слиянии нейтронных звёзд. В спектре остатка от слияния нейтронных звёзд был обнаружен стронций — элемент нейтронных захватов. Слияния нейтронных звёзд, происходят гораздо реже, чем “обычные” взрывы сверхновых, поэтому самые тяжёлые элементы реже всего встречаются в природе. Эти события так редки, что во многих маломассивных карликовых галактиках они и вовсе не случились. А вот если такое событие произошло, то это не останется незамеченным. Например, в карликовых галактиках в созвездии Сетка, Тукан и Журавль наблюдаются старые звёзды, сильно обогащённые элементами, которые производятся в реакциях быстрых нейтронных захватов (европий, барий).

В заключение хочется повторить, что со времён древних представления о “хрустальной” небесной сфере до нашего времени кардинально изменилось представление о звёздах Галактики: от неподвижных светил — к системе, где всё движется, вращается, сливается и течёт. Благодаря спектроскопическим обзорам, удалось определить химический состав этих звёзд, что помогает понять, в результате каких процессов и в каком количестве образуются разные химические элементы. Нынешнюю ситуацию в области исследования Галактики можно сравнить с “золотой лихорадкой” — большой объём наблюдательных данных порождает лавинообразное открытие звёздных систем. Обнаружены десятки звёздных потоков, и новые открытия не иссякают. Впереди предстоит большая работа по дальнейшим наблюдениям и расшифровке спектров звёзд, принадлежащим всем этим подсистемам и восстановлению как их отдельных историй звездообразования, так и полной картины событий, происходивших в Млечном Пути. И можно сказать, что в истории Галактики мы только начали знакомство с действующими лицами.

## Рекомендованная литература

1. "Галактики" под редакцией В. Г. Сурдина, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019.
2. Сайт Европейского космического агентства ESA [https://www.esa.int/Science\\_Exploration](https://www.esa.int/Science_Exploration)
3. "Археология Млечного Пути", Т. М. Ситнова, Земля и Вселенная, 6/2021.

# **СПИСОК НЕКОТОРЫХ РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ В ПОМОЩЬ УЧИТЕЛЯМ АСТРОНОМИИ И ЛЕКТОРАМ ПЛАНЕТАРИЕВ**

**Е.Н. Типикина,**

*заведующая обсерваторией Государственного музея  
истории космонавтики им. К.Э. Циолковского*

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**

1. <http://www.edu.ru/file/docs/2017/06/m506.pdf> — Стандарт полного среднего образования по астрономии (Приказ № 506 от 7 июня 2017 года)
2. <http://www.myastronomy.ru/> — Моя астрономия
3. <https://sites.google.com/site/auastro/> — Российская Ассоциация учителей астрономии
4. <https://vk.com/astroedu> — Астрономическое образование (сообщество в социальной сети «ВКонтакте»)



5. <https://www.afportal.ru/> — Астрофизический портал
6. <http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/guest/help.html> — АстрО «В помощь учителю и школьникам»
7. <http://pshv.nironn.ru/sites/default/files/pshv-3-2021.pdf> — Журнал «Практика школьного воспитания» №3 за 2021 год — номер целиком посвящён преподаванию астрономии в Нижегородской области.
8. <https://astromodel.ru/> — Astromodel — учебно-сетевой ресурс для углубленного изучения физики и астрономии на основе идей проектного обучения, методов математического моделирования и языка программирования «Python»
9. <http://astroexperiment.ru/astro/index.shtml> — Астрономические опыты
10. <http://www.astro.websib.ru/> — Астрономия (сайт учителя А.В. Максименко)
11. [www.astro-cabinet.ru](http://www.astro-cabinet.ru) — «Кабинетъ» — материалы по истории астрономии
12. <https://learningapps.org/index.php?category=80&s> — LearningApps.org — создание мультимедийных интерактивных упражнений
13. <https://urok.1sept.ru/astronomy> — Материалы фестиваля педагогических идей «Открытый урок»
14. <http://www.schoolpress.ru/products/rubria/list.php?ID=250> — Каталог статей по астрономии журнала «Физика в школе»
15. <http://www.schoolpress.ru/products/rubria/list.php?ID=264> — Каталог статей по астрономии журнала «Физика для школьников»
16. [www.class-fizika.narod.ru/astr.htm](http://www.class-fizika.narod.ru/astr.htm) — Класс!ная физика — Астрономия

17. <https://videouroki.net/video/astronomiya/> — Видеоуроки по астрономии
18. <https://www.youtube.com/c/infourok/playlists> — Инфоурок (видеоуроки по физике и астрономии)
19. [www.media.msu.ru/?cat=136](http://www.media.msu.ru/?cat=136) — видеоархив МГУ имени М.В.Ломоносова (лекции по астрономии)
20. [www.univertv.ru/video/astronomiya/](http://www.univertv.ru/video/astronomiya/) — архив документальных и популярных фильмов по астрономии и космонавтике
21. [http://seninvg07.narod.ru/004\\_astron.htm](http://seninvg07.narod.ru/004_astron.htm) — Астрономия: интерактивные проекты на уроке
22. [https://project.lektorium.tv/spaceschool?utm\\_source=newsletter&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=spaceschool](https://project.lektorium.tv/spaceschool?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=spaceschool) — Лекториум

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ О СОЛНЦЕ

1. <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> — Центр прогнозирования космической погоды
2. <http://spaceweather.izmiran.ru/> — Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН
3. <http://space-live.ru/sun-onlain/> — Солнце онлайн, наблюдение обсерватории NASA/ESA
4. [https://in-space.ru/solntse\\_onlain/](https://in-space.ru/solntse_onlain/) — Солнце онлайн
5. [https://thesis.lebedev.ru/sun\\_flares.html](https://thesis.lebedev.ru/sun_flares.html) — Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца, ФИАН
6. <https://priroda.inc.ru/pogoda/solnze.html> — Мониторинг Солнца в реальном времени

7. <https://spacegid.com/nablyudeniya-za-solntsem-v-rezhime-realnogo-vremeni.html> — Наблюдения за Солнцем в режиме реального времени
8. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечные\\_пятна](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечные_пятна) — Солнечные пятна
9. [https://smotrim.ru/video/1231083?utm\\_source=player&utm\\_campaign=blocked\\_embed](https://smotrim.ru/video/1231083?utm_source=player&utm_campaign=blocked_embed) — «Пятна на Солнце» — передача канала «Культура» из цикла «Жизнь замечательных идей»
10. <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEdecade/SEdecade2021.html> — Солнечные затмения

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ О ЛУНЕ

1. <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/lunar.html> — Данные о лунных затмениях
2. <https://spacegid.com/what-the-moon-looks-like-now.html> — Луна онлайн
3. <http://astroexperiment.ru/astro/moonmont.shtml> — Лунный альпинизм
4. <https://moon.nasa.gov/> — Луна: Наука НАСА
5. <https://in-space.ru/sputnik-luna/> — Спутник Луна

## ЗВЕЗДНЫЕ КАТАЛОГИ

1. <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/> — Астрономическая база данных SIMBAD

2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Каталог\\_Мессье](https://ru.wikipedia.org/wiki/Каталог_Мессье) — Каталог Мессье
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Новый\\_общий\\_каталог](https://ru.wikipedia.org/wiki/Новый_общий_каталог) — Новый общий каталог
4. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Каталог\\_Колдуэлла](https://ru.wikipedia.org/wiki/Каталог_Колдуэлла) — Каталог Колдуэлла

## САЙТЫ ПЛАНЕТАРИЕВ, МУЗЕЕВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕМАТИКИ

1. [http://www.astro.websib.ru/sprav/spis\\_planetar](http://www.astro.websib.ru/sprav/spis_planetar) — Список планетариев России
2. <http://www.apr.planetariums.ru/> — Ассоциация Планетариев России (АПР)
3. <https://kosmo-museum.ru/> — Музей космонавтики Москвы
4. <https://gmik.ru/> — Государственный музей истории космонавтики (г. Калуга)
5. <https://dkc43.ru/> — Музей К. Э. Циолковского, авиации и космонавтики (Кировская область, г. Киров)
6. <http://samaracosmos.ru/> — Самара космическая, музейно-выставочный центр
7. <https://vsemuzei.com/rossiya/rostovskij-muzej-kosmonavtiki> — Ростовский музей Космонавтики
8. [https://музейкосмонавтики.рф/?page\\_id=303](https://музейкосмонавтики.рф/?page_id=303) — Список музеев космической тематики

## ПОПУЛЯРНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ САЙТЫ

1. [www.astronet.ru](http://www.astronet.ru) — Российская Астрономическая Сеть. Один из самых обширных сайтов по астрономии
2. <http://астрономия.рф/> — Общероссийский астрономический портал
3. <http://www.astrotop.ru/> — Астротоп 100 России — народный рейтинг астрокосмических сайтов
4. [www.allplanets.ru](http://www.allplanets.ru) — Планетные системы, информация об экзопланетах
5. [www.astronews.ru](http://www.astronews.ru) — Новости космоса, астрономии и космонавтики
6. Москва астрокосмическая (<https://www.google.ru/maps/d/viewer?hl=ru&oe=UTF8&vps=1&msa=0&ie=UTF8&jsv=329b&mid=1wFHuDYN-e7MEVkJaxcpwthqVNNk&ll=55.716918211390556%2C37.62875749999999&z=11>) — Москва астрокосмическая (Google Мои карты)

## КОСМОС ДОШКОЛЬНИКАМ И ШКОЛЬНИКАМ

1. <https://space4kids.ru/> — Ключ на старт. Космос для детей
2. <https://pgbooks.ru/archive/blog/cosmoblog/> — Космоблог — новости астрономии на сайте издательства «Розовый жираф»
3. [www.kosmos-x.net.ru](http://www.kosmos-x.net.ru) — Энциклопедия юного астронома
4. [www.astronos.ru](http://www.astronos.ru) — Популярная астрономия: сведения по истории астрономии, краткие данные о небесных объектах

5. [www.kosmos.dljatebja.ru](http://www.kosmos.dljatebja.ru) — Энциклопедия астрономии и космонавтики
6. [https://radostmoya.ru/project/akademiya\\_zanimatelnyh\\_nauk\\_astronomiya/](https://radostmoya.ru/project/akademiya_zanimatelnyh_nauk_astronomiya/) — Академия занимательных наук.  
Астрономия
7. <http://astrodistant.ru/> — ASTRODISTANT.RU — Интерактивная учебная среда.
8. <https://distant.msu.ru/course/index.php?categoryid=85> — Заочная Астрономическая Школа на базе Центра Дистанционного Образования МГУ

## ШКОЛЬНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОЛИМПИАДЫ

1. <http://www.rosolymp.ru/> — Официальный сайт всех Всероссийских олимпиад, первоисточник нормативных документов
2. <https://olimpiada.ru/main/> — Информация о различных олимпиадах для школьников (все предметы), официальные документы
3. <http://www.astroolymp.ru/> — Всероссийская олимпиада школьников (астрономия)
4. <http://school.astro.spbu.ru/> — Школьная астрономия Петербурга
5. <http://mosastro.olimpiada.ru/> — Московская астрономическая олимпиада
6. <https://admissions.kpfu.ru/mro> — Межрегиональные предметные олимпиады Казанского федерального университета

7. <http://www.issp.ac.ru/iao/nsc/> — Сайт олимпиады наукоградов и научных центров (ННЦ)
8. <http://sesc.nsu.ru/vsesib/> — Всесибирская открытая олимпиада школьников
9. <https://vk.com/ursaminornsk> — Астрономическая олимпиада «Малая Медведица» для школьников 5–7 классов
10. <http://www.planetarium-nn.ru/obrazovanie/zaochnaya-astrokosmicheskaya-olimpiada/> — Заочная олимпиада по астрономии и космонавтике — 2021, посвященная 60-й годовщине первого полёта человека в космос
11. <http://www.znanienn.ru/astrolymp> — Открытая городская олимпиада по астрономии, астрофизике и физике космоса Нижнего Новгорода
12. <http://www.vostok1start.ru/> — Ежегодная Открытая республиканская образовательная интернет-викторина республики Саха (Якутия)
13. <http://www.issp.ac.ru/iao/> — The International Astronomy Olympiad (IAO)
14. <https://www.ioaastrophysics.org/> — International Olympiad on Astronomy and Astrophysics (IOAA)
15. <http://www.issp.ac.ru/iao/apao/> — The Asian-Pacific Astronomy Olympiad (АРАО)
16. <https://vk.com/astroolympiads> — Самое большое сообщество «ВКонтакте», где обсуждаются астрономические олимпиады
17. <http://astroturnir.ru/intro.html> — Российско-Международный астрономический турнир школьников
18. <https://vk.com/astroturnir> — Официальная группа Российско-Международного астрономического турнира школьников в социальной сети «ВКонтакте»
19. <http://turlom.olimpiada.ru/description> — Турнир имени М.В. Ломоносова

## АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОТДЕЛЕНИЯ В ВУЗах

1. <http://www.sai.msu.ru/ao/> — Астрономическое отделение Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
2. <http://www.math.spbu.ru/ru/> — Математико-механический факультет Санкт-Петербургского Государственного Университета
3. <https://insma.urfu.ru/admissions/bac/44-progs/192-astronomy> — Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета
4. <https://kpfu.ru/physics/struktura/kafedry/otdelenie-astrofiziki-i-kosmicheskoy-geodezii> — Кафедра астрономии и космической геодезии Казанского федерального университета
5. <http://ff-tsu.ru/> — Физический факультет Томского государственного университета

## ИНТЕРАКТИВНЫЕ УЧЕБНИКИ И ЗАДАЧНИКИ ПО АСТРОНОМИИ

1. [https://multiring.ru/course/astronomy/content/index.html#.WBfa3\\_mLRD9](https://multiring.ru/course/astronomy/content/index.html#.WBfa3_mLRD9) — Интерактивный учебник Открытая Астрономия 2.6 (автор Н.Н. Гомулина)
2. <https://web.archive.org/web/20090820184740/http://heiki.rssi.ru/~nik/astro/index.html> — Основы астрономии. Учебный курс на базе основ физики и математики (автор Н. Александрович)



3. <https://www.mccme.ru/free-books/shen/shen-cosmo.pdf> — Космография (электронная версия сборника по основным вопросам астрономии, автор Александр Шень)
4. <http://www.astronet.ru/db/msg/1249132> — Геометрия звёздного неба (автор В.Ю. Протасов)
5. <http://cosmo-irk.ru/> — Космология — электронный учебник (авторы Д.Ю. Климускин, С.В. Граблевский)
6. [https://kpfu.ru/portal/docs/F\\_1959000255/Zhuchkov..R.Ya..Astrofotografiya.v.zadachakh.pdf](https://kpfu.ru/portal/docs/F_1959000255/Zhuchkov..R.Ya..Astrofotografiya.v.zadachakh.pdf) Астрофотография в задачах (Р.Я. Жучков, Е.Н. Типикина, издательство КФУ)
7. [https://kpfu.ru/staff\\_files/F\\_1561566671/Zadachnik\\_chast2\\_20210330\\_KFU.pdf](https://kpfu.ru/staff_files/F_1561566671/Zadachnik_chast2_20210330_KFU.pdf) — Астрофотография в задачах. Часть 2 (Р.Я. Жучков, Е.Н. Типикина, издательство КФУ).
8. [http://www.astroolymp.ru/books/moscow\\_1.pdf](http://www.astroolymp.ru/books/moscow_1.pdf) — Задачи Московской Астрономической олимпиады. 1997–2002 (под редакцией О.С. Угольникова и В.В. Чичмаря)
9. [http://www.astroolymp.ru/books/moscow\\_2.pdf](http://www.astroolymp.ru/books/moscow_2.pdf) — Задачи Московской Астрономической олимпиады. 2003–2005 (под редакцией О.С. Угольникова и В.В. Чичмаря)
10. [http://www.astroolymp.ru/books/moscow\\_3.pdf](http://www.astroolymp.ru/books/moscow_3.pdf) — Задачи Московской Астрономической олимпиады. 2006–2015 (под редакцией М.В. Кузнецова, Н.Ю. Подорванюка и О.С. Угольникова)
11. [http://crydee.sai.msu.ru/ak4/Table\\_of\\_Content.htm](http://crydee.sai.msu.ru/ak4/Table_of_Content.htm) — Общий курс астрономии. Электронный учебник для студентов (авторы Э.В. Кононович, В.И. Мороз)
12. <http://www.astro.spbu.ru/staff/viva/Book/Book.html> — Парадоксальная Вселенная. Электронная версия задачника по астрономии (авторы В.В. Иванов, А.В. Кривов, П.А. Денисенков)

13. <https://olympiads.mccme.ru/turlom/astrbook/romanov.pdf> — Занимательные вопросы по астрономии и не только. (автор А.М. Романов)
14. <https://booksonline.com.ua/view.php?book=127093> — Расширяя границы Вселенной. История астрономии в задачах (авторы Гусев Е.Б., Сурдин В.Г.)
15. <http://www.astronet.ru/db/msg/1179964> — Качественные задачи по астрономии (автор Е.Б. Гусев)
16. <http://www.astronet.ru/db/msg/1175204> — 300 вопросов по астрономии (автор В.Ф. Орлов)
17. <http://www.astronet.ru/db/msg/1175203> — Литература и астрономия. Сто ошибок в произведениях художественной литературы (автор В.П. Лепилов)
18. <http://vestishki.ru/content/селешников-с-и-астрономия-и-космонавтика> — Астрономия и космонавтика. Краткий хронологический справочник с древнейших времён до наших дней (автор С.И. Селешников)
19. [www.krugosvet.ru](http://www.krugosvet.ru) — Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия со специальным разделом, посвященным астрономии. Представлен астрономический словарь
20. [www.cosmoworld.ru](http://www.cosmoworld.ru) — Космический мир: информация о российском космосе. Публикуется информация об изучении космоса российскими учеными. Любопытные рассказы о космонавтах, конструкторах, космодромах, ракетах-носителях.

# ЗНАКОВЫЕ ДАТЫ 2022 ГОДА В АСТРОНОМИИ И КОСМОНАВТИКИ

**Е.Н. Типикина,**

*заведующая обсерваторией Государственного музея  
истории космонавтики им. К.Э. Циолковского*

390 лет

В 1632 году во Флоренции Г. Галилей опубликовал книгу, написанную на итальянском языке (а не на латыни, как было принято в то время), «Диалог о двух главнейших системах мира» (рис. 1) — итог почти 30-летней научной работы.

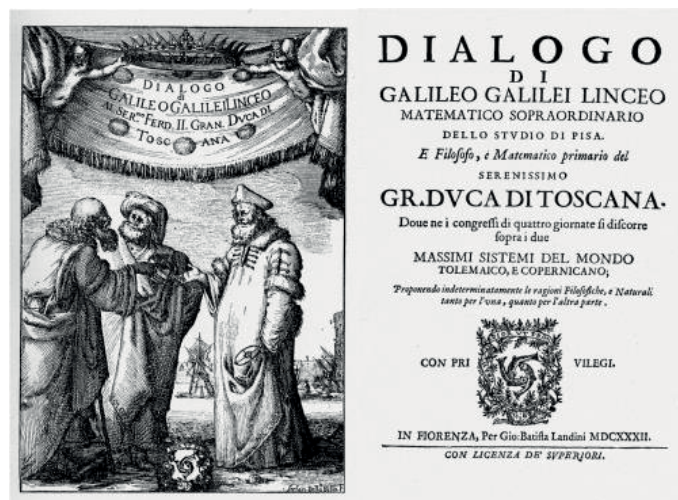


Рис. 1. Первое издание «Диалога о двух главнейших системах мира»

Труд представлял собой рассуждения о гелиоцентрической (коперниковой) и геоцентрической (птолемеевой) системах мира, выраженные в виде разговора между тремя любителями науки: коперниканцем Сальвиати, нейтральным участником Сагрето и «простаком» Симпличио, повторяющим постулаты Аристотеля и Птолемея.

## 375 лет

В **1647** году выходит книга польского астронома Яна Гевелия «Селенография, или описание Луны», содержащая первые карты Луны (рис. 2) и описание её поверхности по результатам наблюдения в телескоп и зарисовкам автора. Для некоторых объектов на поверхности Луны Гевелий предложил названия аналогичные геологическим образованиям на Земле, частично эти обозначения мы используем до нашего времени (лунные горы: Апеннины, Кавказ, и др.).



*Рис. 2. Карта Луны Яна Гевелия*

## 350 лет

**1672** год — первое надежное определение параллакса Солнца. Джон Флемстид, по наблюдению положений Марса около Солнца и звёзд, получил значение  $10''$ , а Джованни Кассини —  $9,5''$  (современное значение —  $8,794''$ ). Это позволило впервые правильно оценить расстояние от Земли до Солнца.

## 335 лет

В **1687** году выходят все три тома трудов Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии» (рис. 3). В книгах определены базовые понятия механики и введены новые (например, импульс), сформулированы три закона механики, закон всемирного тяготения, показан вывод законов движения планет Кеплера из закона тяготения, описаны гиперболические и параболические орбиты космических тел и др.

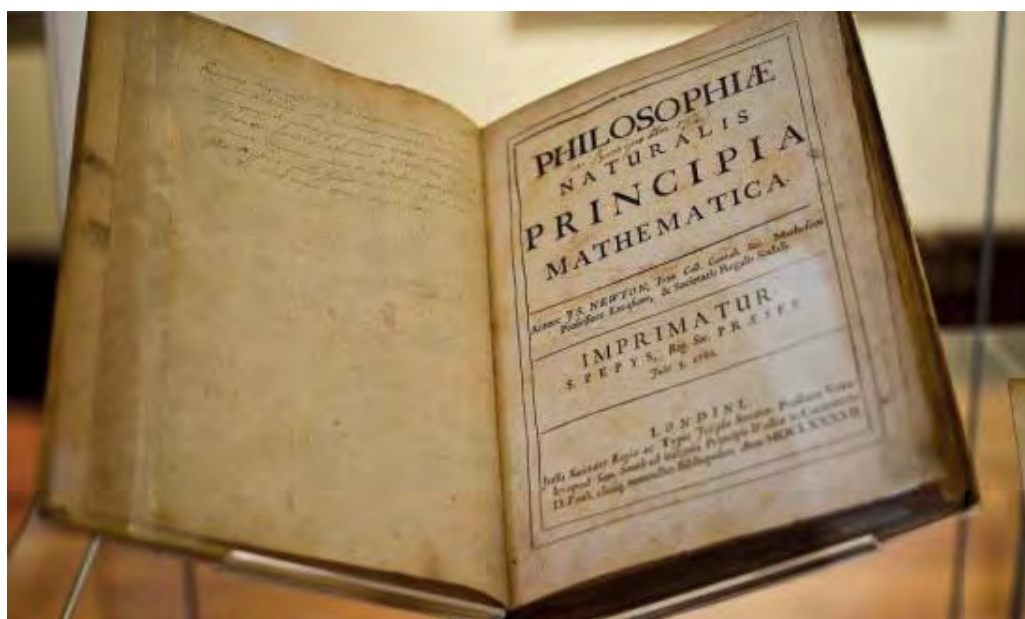


Рис. 3. Титульный лист «Начал» Исаака Ньютона

## 200 лет

В **1822** году немецкий астроном Карл Людвиг Гардинг (рис. 4), открывший астероид Юнона, издал последний том своего «Нового атласа неба». В атласе впервые отсутствовали изображения фигур созвездий.



*Рис. 4. К.Л. Гардинг*

## 185 лет

В **1837** году В. Я. Струве (рис. 5) выполняет первое в истории измерение годичного параллакса звезды. Наблюдения проводились для звезды Вега ( $\alpha$  Лиры).

## 175 лет

В **1847** году В. Я. Струве публикует труд «Этюды звёздной астрономии», где описывает свои предположения о строении Млечного Пути и высказывает мысль о наличии в межзвездном пространстве тёмной, разреженной, поглощающей свет материи.



*Рис. 5. В.Я. Струве*

Василий Яковлевич Струве — российско-немецкий астроном, один из основоположников звёздной астрономии, первый директор Пулковской обсерватории, член-учредитель Русского географического общества.

## 100 лет

В 1922–1924 годах Александр Александрович Фридман (рис. 6) — российский и советский математик и физик, осново-

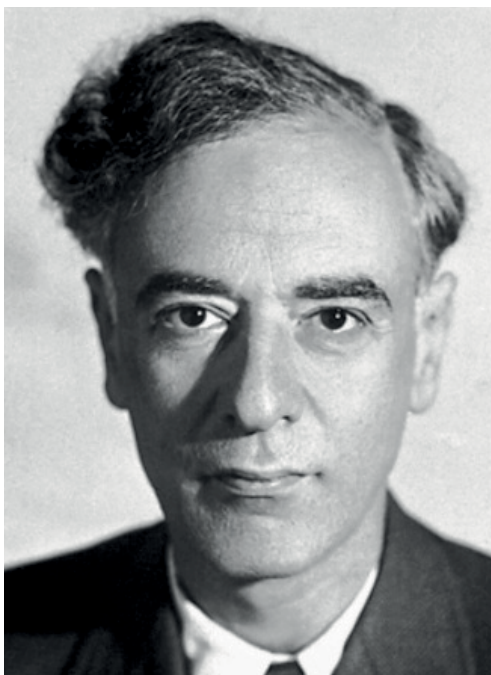


*Рис. 6. А.А. Фридман*

положник современной физической космологии, представляет исторически первую модель нестационарной Вселенной на основании решения уравнений Эйнштейна.

## 90 лет

В **1932** году Лев Давидович Ландау (рис. 7) — советский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике, предсказал существование звёзд, сравнимых по массе с Солнцем, но имеющих очень малые размеры (10–20 км). Эти сверхплотные объекты позднее назвали нейтронными звёздами.



*Рис. 7. Л.Д. Ландау*

В **1932** году Эдвин Пауэлл Хаббл (рис. 8) — американский астроном и космолог, проводя наблюдения туманности Андромеды на крупнейшем в то время телескопе-рефлекторе с диаметром зеркала 2,5 м обсерватории Маунт-Вилсон, обнаружил первые шаровые звёздные скопления не принадлежавшие Млечному Пути.

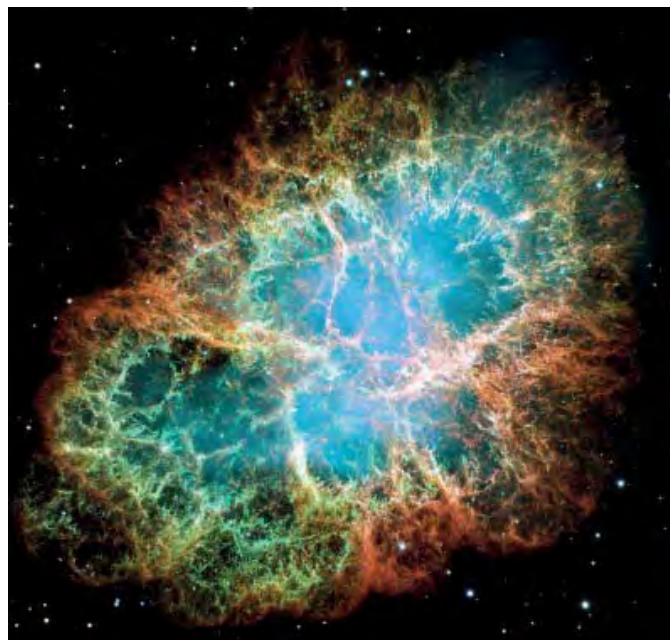




*Рис. 8. Э. Хаббл у 100-дюймового телескопа в обсерватории Маунт-Вилсон*

## 80 лет

В **1942** году американский астроном Николас Ульрих Мейол, на основе проведённых в 1937 году наблюдений спектра Крабовидной туманности (рис. 9), совместно с нидерландским



*Рис. 9. Крабовидная туманность в созвездии Телец*

астрономом Яном Хендриком Оортом показал, что туманность представляет собой остаток взрыва Сверхновой, о наблюдении которой в 1054 году упоминается в китайских летописях.

## 55 лет

Открытие первой нейтронной звёзды произошло в **1967** году, когда Джоселин Белл обнаружила объект, излучающий регулярные радиоимпульсы с очень коротким периодом (пульсар PSR B1919+21).

## 30 лет

В январе **1992** года после анализа данных эксперимента РЕЛИКТ-1 (космический аппарат «Прогноз-9» (рис. 10) с аппаратурой для измерения реликтового излучения был запущен в СССР ещё в 1983 году), российские учёные опубликовали выводы об обнаружении анизотропии реликтового излучения. Немного позже аналогичные выводы обнародовали американские учёные на основе данных эксперимента СОВЕ.

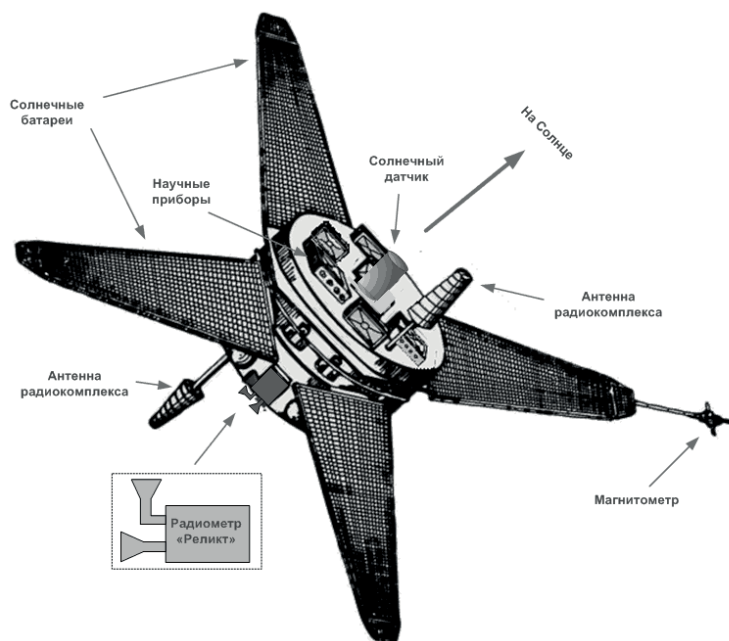


Рис. 10. «Прогноз-9» — космический аппарат, на котором проводился эксперимент РЕЛИКТ-1

# ЯНВАРЬ

30 лет

**9 января 1992 года** опубликована статья польского радиоастронома Александра Вольщана (рис. 11) и канадского астронома Дейла Фрейла об открытии у пульсара PSR 1257+12, расположенного на расстоянии около 2300 световых лет от Солнца, двух планет, обнаруженных по периодическому изменению частоты прихода импульсов. Массы планет оказались в четыре раза больше массы Земли. Это было первое подтверждённое открытие экзопланет, т.е. планет вне Солнечной системы. Позже в планетной системе пульсара обнаружили ещё одну планету с массой вдвое больше массы Луны.



*Рис. 11. Радиоастроном А. Вольщан, обнаруживший первые экзопланеты у нейтронной звезды*

235 лет

**11 января 1787 года** английский астроном Фредерик Уильям Гершель (рис. 12) через шесть лет после открытия планеты Уран обнаружил у него первые два спутника — Титанию и Оберон. В настоящее время у Урана известно 27 спутников.



*Рис. 12. Ф.У. Гершель*

115 лет

**12 января 1907 года** родился Сергей Павлович Королёв (рис. 13) – учёный, основоположник практической космонавтики, главный конструктор ракетно-космической техники в СССР, организатор работ по созданию и запуску первого спут-



*Рис. 13. С.П. Королёв*

ника Земли, первых космических аппаратов к Луне, первого человека в космос и др. Передовые идеи Королёва в области развития ракетного вооружения и ракетно-космических систем позволили обеспечить стратегический паритет и сделали нашу страну ведущей космической державой.

## 160 лет

**31 января 1862 года** Алван Грейам Кларк, испытывая новый 46 сантиметровой (18 дюймов) телескоп-рефрактор, открыл спутник Сириуса — Сириус В. Гипотезу о существовании невидимой глазом звезды-спутника у Сириуса высказал в 1844 году Фридрих Бессель, анализируя наблюдаемые отклонения в его движении (рис. 14). Сириус В — первый обнаруженный белый карлик, имеет 8-ю видимую звёздную величину. Две звезды вращаются вокруг общего центра масс на расстоянии примерно 20 а. е. с периодом оборота, близким к 50 годам.

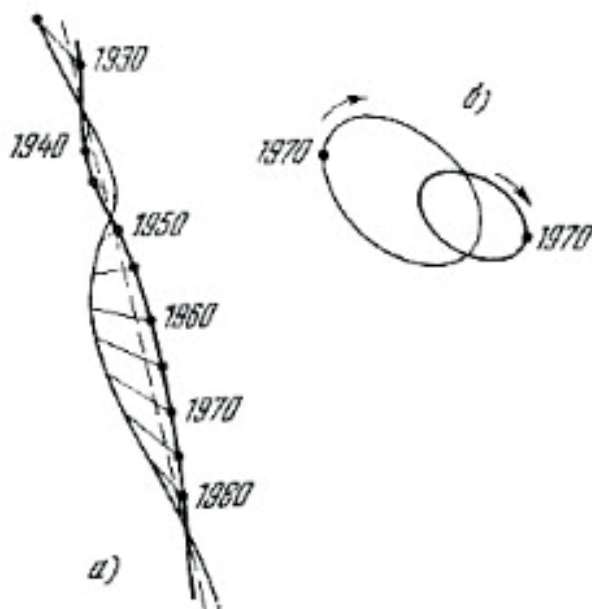


Рис. 14. Движение Сириуса и его спутника. а) видимые движения Сириуса (жирная линия), спутника (тонкая линия) и их центра масс (штриховая линия); б) видимые орбиты обеих звёзд вокруг общего центра масс

## ФЕВРАЛЬ

80 лет

**В феврале 1942 года** английский радиоинженер Джеймс Стэнли Хей, работая на радиолокационной станции британской армии и изучая помехи, мешающие работе радара, открыл радиоизлучение Солнца в диапазоне метровых длин.

125 лет

**7 февраля 1897 года** родился Александр Леонидович Чижевский (рис. 15) — учёный, основоположник гелиобиологии, электрогематологии, создатель электроэффлювиальной люстры (люстры Чижевского), представитель русского космизма.



*Рис. 15. А.Л. Чижевский*

50 лет

**25 февраля 1972 года** в 40 км к северо-западу от города Джезказган (ныне Жезказган, Казахстан) совершила мяг-

кую посадку возвращаемая ступень автоматической станции «Луна-20» (рис. 16). Она доставила на Землю лунный грунт массой 55 грамм, представлявший собой рыхлый разнозернистый материал светло-серого цвета. Бурение лунной поверхности, забор грунта, его герметизация в спускаемом аппарате осуществлялись по команде с Земли. Это был второй успешный полёт космического аппарата (после «Луны-16»), в ходе которого была осуществлена автоматическая доставка образцов лунного реголита.



*Рис. 16. «Луна-20»*

## 55 лет

**28 февраля 1967 года** запущен искусственный спутник Земли «Космос-144» (рис. 17). Этот космический аппарат стал вторым советским метеорологическим спутником после «Космоса-122», но первым метеоспутником, запущенным с космодрома «Плесецк» на низкую околополярную, почти круговую орбиту высотой 625 км. Научное оборудование аппарата позволяло изучать над обширными территориями планеты облачность,

снежный покров, ледовые поля, измерять потоки радиации, отраженной и излучаемой системой «Земля — атмосфера». Спутник закончил работу в марте 1968 года.



*Рис. 17. Советский метеорологический спутник «Космос-144»*

## 75 лет

**12 февраля 1947 года** в атмосферу Земли влетел крупный железный метеорит. Разрушившись в воздухе, он выпал «железным дождём» на западных отрогах Сихотэ-Алинского хребта в Приморском крае. Общая масса осколков оценивается в 60–100 тонн, а самый крупный целый фрагмент весит 1745 кг. Обнаружили место падения метеорита лётчики Дальневосточного геологического управления. Первая научная экспедиция для сбора информации о падении и частей метеорита под руководством академика В. Г. Фесенкова вышла в тайгу в апреле 1947 года. Сихотэ-Алинский метеорит входит в десятку крупнейших метеоритов мира.





*Рис. 18. Фрагмент Сихотэ-Алинского метеорита в планетарии ГМИК им. К. Э. Циолковского*

## МАРТ

40 лет

**1 и 5 марта 1982 года** советские автоматические станции «Венера-13» (рис. 19) и «Венера-14» достигли Венеры. Спускаемые аппараты совершили мягкую посадку на поверхность планеты.



*Рис. 19. Макет посадочного аппарата «Венера-13»*

В ходе их работы были зафиксированы многочисленные грозы, получены черно-белые и первые в мире цветные панорамные снимки венерианского пейзажа, проведён прямой анализ грунта, изучен газовый состав атмосферы, определено, что сера является основным элементом, определяющим состав облачного слоя.

## 50 лет

**3 марта 1972 года** США запустили космический корабль «Пионер-10» (рис. 20). Он стал первым аппаратом, пролетевшим через главный пояс астероидов, и 4 декабря 1973 г. достиг Юпитера, пройдя от планеты на расстоянии 131 000 км, провёл её фотографирование и первые исследования с «близкого» расстояния. Последний сеанс связи с «Пионером-10» состоялся 22–23 января 2003 года. В это время космический аппарат находился на расстоянии 82,19 а. е. от Солнца.



*Рис. 20. Сборка космического аппарата «Пионер-10»*

## 85 лет

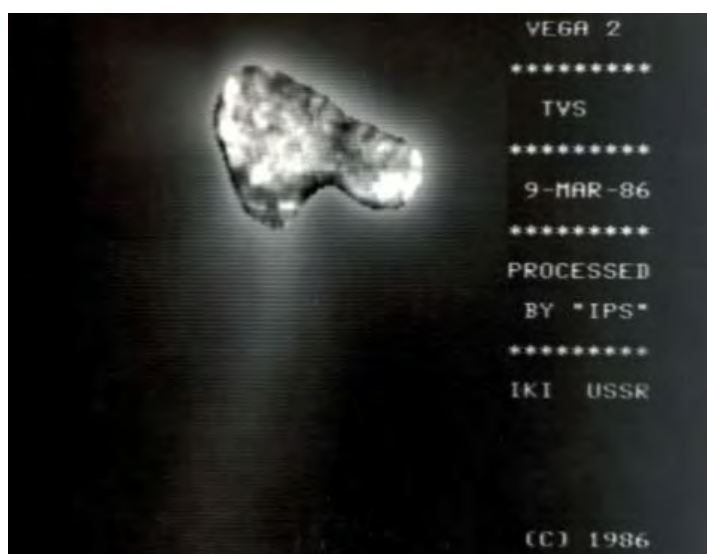
**6 марта 1937 года** родилась Валентина Владимировна Терешкова (рис. 21) — летчик-космонавт СССР, Герой Советского Союза. Первая женщина, побывавшая в июне 1963 г. на космическом корабле «Восток-6» в космосе.



*Рис. 21. В.В. Терешкова*

## 35 лет

**6 и 9 марта 1986 года** советские космические аппараты, созданные в рамках международного проекта «Венера-Галлея», «Вега-1» и «Вега-2» прошли на расстояниях 8890 км и 8030 км



*Рис. 22. Комета Галлея, первая в мире фотография ядра кометы, полученная космическим аппаратом с пролётной траектории*

соответственно от ядра кометы Галлея. Они передали около 1500 снимков внутреннего гало и впервые в истории сфотографировали ядро кометы (рис. 22).

14 марта аппарату Европейского космического агентства «Джотто» удалось подлететь к комете ещё ближе, на расстояние 605 км. Изучение кометы Галлея вели и два японских аппарата: «Суйсэй» и «Сакигакэ».

## 60 лет

**7 марта 1962 года** выведен на низкую почти круговую орбиту вокруг Земли первый аппарат серии американских космических телескопов OSO (Орбитальная Солнечная обсерватория), впервые специально предназначенных для изучения 11-летнего солнечного цикла активности в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (рис. 23).



*Рис. 23. Аппарат OSO*

## 55 лет

**21 марта 1967 года** в космос вышел советский научно-исследовательский искусственный спутник Земли «Космос-149»

(«Космическая стрела»). Аппарат проводил дистанционное зондирование Земли, передавая телевизионное изображение облачного покрова и поверхности нашей планеты, изучал вариации радиационного баланса Земли (рис. 24).



*Рис. 24. ИСЗ «Космос-149»*

## 110 лет

**23 марта 1912** года родился Вернер фон Браун (рис. 25) — один из ведущих специалистов в области ракетной техники в Германии и США. Под его руководством были созданы ФАУ-2, ракета-носитель «Сатурн» и другие ракеты. Он был одним из руководителей программы «Аполлон», заместителем директора NASA по планированию пилотируемых полетов.



*Рис. 25. Вернер фон Браун*

## 50 лет

**27 марта 1972 года** запущена советская автоматическая научно-исследовательская космическая станция «Венера-8» (рис. 26). 22 июля 1972 года спускаемый аппарат станции вошёл в атмосферу планеты и передал информацию о температуре, давлении, скорости ветра. Измерения освещённости у поверхности Венеры показали принципиальную возможность фотосъёмки.



*Рис. 26. Автоматическая космическая станция «Венера-8»*

## 35 лет

**31 марта 1987 года** запущен специализированный астрофизический модуль «Квант» (рис. 27) для стыковки с орбитальной станцией «Мир». Модуль предназначался для проведения исследований в области внеатмосферной астрономии. В состав научной аппаратуры входили ультрафиолетовый телескоп «Глазар», комплекс «Рентген» (включающий телескоп-спектрометр жёсткого рентгеновского излучения «Пульсар X-1» (СССР) с детектором гамма-всплесков космического происхождения, сцинтилляционный телескоп-спектрометр высоких

энергий НЕХЕ (ФРГ); телескоп для построения изображений в рентгеновском диапазоне (Великобритания, Нидерланды)), астрофизическая и геофизическая аппаратура, и др.



*Рис. 27. Модуль «Квант»*

## АПРЕЛЬ

60 лет

**9 апреля 1962 года** Указом Президиума Верховного Совета СССР установлено ежегодное празднование Дня космонавтики 12 апреля.



*Рис. 28. Поздравительная открытка, СССР*

## 55 лет

**13 апреля 1967 года** в Москве представители девяти стран: Болгария, Венгрия, ГДР, Куба, Монголия, Польша, Чехословакия, Румыния и Советский Союз приняли решение о совместной работе по исследованию космического пространства в мирных целях — программу «Интеркосмос».



*Рис. 29. Логотип программы «Интеркосмос»*

## 60 лет

**24 апреля 1962 года** выведен на орбиту искусственный спутник Земли «Космос-3» для исследования полярных сияний.

## 350 лет

**25 апреля 1672 года** Лоран Кассегрен на заседании Французской академии наук представил доклад, в котором рассказал о разработке новой схемы зеркального телескопа. Главное зеркало инструмента представляло собой вогнутую параболическую



поверхность и имело сквозное отверстие посередине (рис. 30). Вторичное выпуклое гиперболическое зеркало отражало собранные главным зеркалом лучи до их схождения в точке фокуса и направляло в центральное отверстие, за которым располагался окуляр. Предложенная конструкция значительно уменьшала размер трубы телескопа и почти полностью компенсировала сферическую aberrацию, благодаря чему нашла широкое применение.

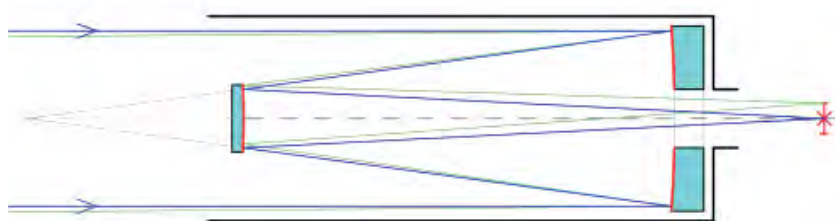


Рис. 30. Оптическая схема телескопа Кассегрена

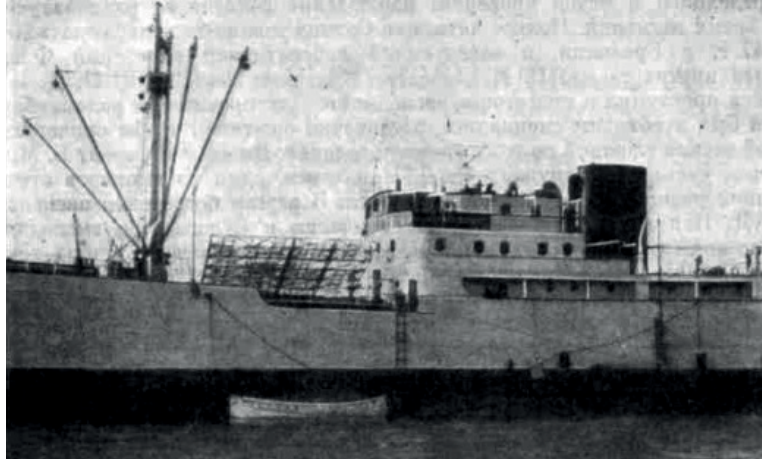
## МАЙ

### 100 лет

**2–10 мая 1922 года** в Риме состоялась I Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС), одним из решений которой было деления неба на 88 участков — созвездий.

### 75 лет

**20 мая 1947 года** наблюдалось полное солнечное затмение. Полоса затмения проходила по территории Бразилии, куда и была направлена на теплоходе «Грибоедов» (рис. 31) экспедиция Академии Наук СССР. В ходе измерений радиосигнала от Солнца на волне 1,5 м экспериментально было открыто предсказанное теоретиками радиоизлучение солнечной короны.



*Рис. 31. Теплоход «Грибоедов» в заливе Баии (Бразилия).  
На палубе синфазная антенна, с помощью которой советские учёные  
впервые наблюдали радиозатмение Солнца*

## 55 лет

**25 мая 1967 года** запущен первый советский спутник связи «Молния-1» (рис. 32). Началась эра космического телевизионного вещания. Серия аппаратов «Молния» обеспечила радиосвязь между Москвой и Владивостоком, телефонно-телеграфную связь удалённых районов крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, ретрансляцию телевизионных передач. С 2006 года на смену спутникам «Молния» стали приходить более совершенные аппараты «Меридиан».



*Рис. 32. Спутник связи «Молния-1»*

# ИЮНЬ

## 55 лет

**12 июня 1967 года** запущен советский космический аппарат «Венера-4» (рис. 33), который, достигнув планеты Венера, 18 октября 1967 года, вошёл в её атмосферу и впервые осуществил плавный спуск. В ходе работы станции были проведены первые прямые измерения температуры, плотности, давления и химического состава атмосферы Венеры. Показано, что примерно 90% венерианской атмосферы составляет углекислый газ.

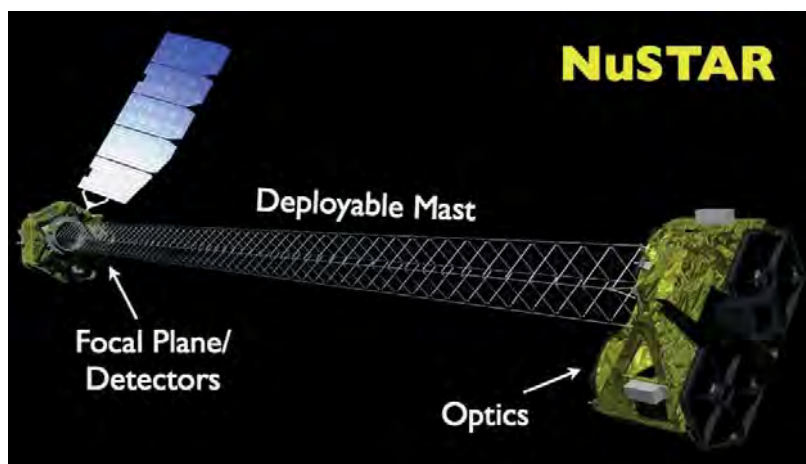


*Рис. 33. Спускаемый аппарат «Венера-4»*

## 10 лет

**13 июня 2012 года** запущена первая космическая обсерватория Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR), работающая на принципе скользящего отражения в диапазоне жёсткого рентгеновского излучения (рис. 34). Телескоп ведёт наблюдение

за излучением остатков сверхновых звёзд, активными ядрами галактик, поведением частиц вблизи сверхмассивных объектов, ведёт обзор площадок неба с целью выявления чёрных дыр и изучения их популяции.



*Рис. 34. Схема рентгеновской обсерватории NuSTAR*

## 55 лет

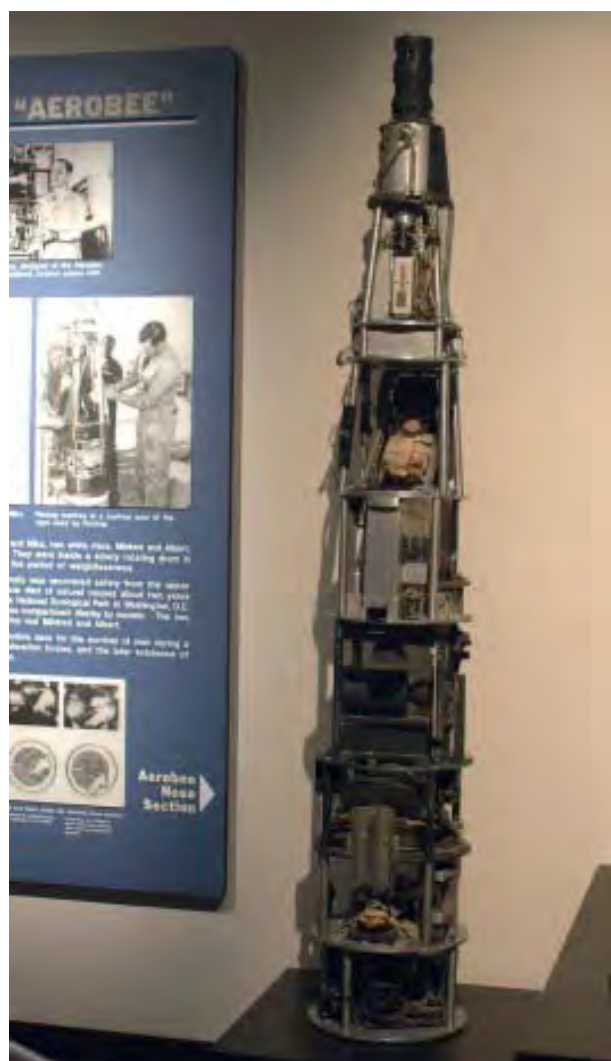
**16 июня 1967 года** запущен космический аппарат «Космос-166» (рис. 35) — первая советская орбитальная специализированная солнечная обсерватория для изучения нашего светила в рентгеновском диапазоне.



*Рис. 35. «Космос-166» в ГМИК им. К.Э. Циолковского*

## 60 лет

**19 июня 1962 года** была запущена американская геофизическая ракета «Аеробее-150» (рис. 36) с детекторами мягкого рентгеновского излучения. Руководил командой исследователей итальяно-американский астрофизик Риккардо Джаккони. На высоте 225 км датчики впервые зафиксировали источник рентгеновского излучения за пределами Солнечной системы. Позже ему дали название Sco X-1 и связали с оптической звездой V818 в созвездии Скорпион. Так появилось новое направление исследований — рентгеновская астрономия.



*Рис. 36. Головная часть ракеты Aerobee*

## ИЮЛЬ

25 лет

**4 июля 1997 года** на поверхность Марса с помощью автоматической межпланетной станции «Марс Патфайндер» (США) был доставлен первый самоходный аппарат — марсоход «Соджорнер» (рис. 37). Планетоход имел массу около 15,5 кг и размеры 65×48×30 см. «Соджорнер» проработал на Марсе 83 марсианских дня, пока не вышла из строя базовая спускаемая станция, служившая ретранслятором. За это время марсоход преодолел 100 м и передал панорамы Марса, информацию о химическом составе грунта.



*Рис. 37. Марсоход «Соджорнер»*

## АВГУСТ

60 лет

**11 и 12 августа 1962 года** запущены космические корабли «Восток-3» с космонавтом Андрияном Григорьевичем Николаевым (рис. 38) и «Восток-4» с космонавтом Павлом Романовичем Поповичем (рис. 39), осуществившие первый в мире групповой



*Рис. 38. А.Г. Николаев*

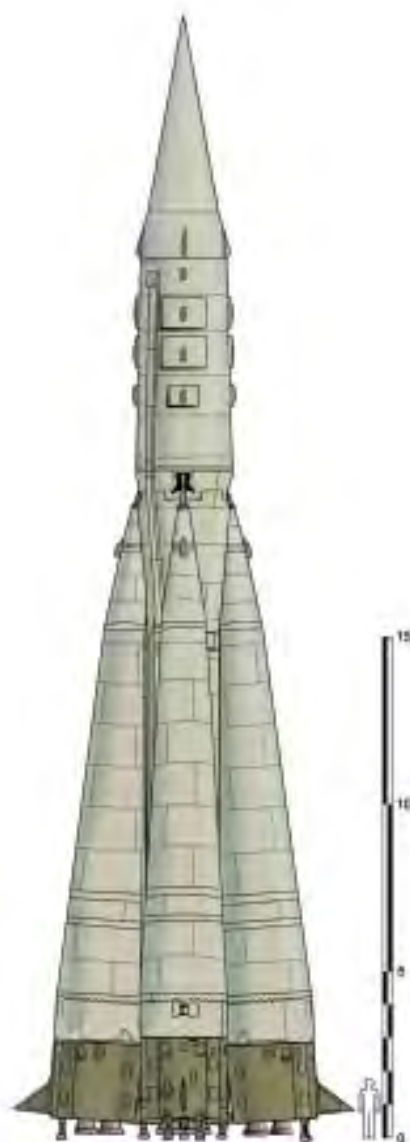


*Рис. 39. П.Р. Попович*

полёт. Между кораблями, одновременно находящимися на орбите, поддерживалась радиосвязь и впервые транслировалось телеизображение космонавтов.

## 65 лет

**21 августа 1957 года** выполнен успешный запуск первой в мире двухступенчатой межконтинентальной баллистической ракеты Р-7 с дальностью полёта 8000 км конструкции С. П. Королёва (рис. 40). Ракета, стартовав с испытательной площадки (в будущем космодром Байконур), доставила головную часть в район полигона Кура (Камчатка). Ракеты семейства Р-7 открыли дорогу в космос: с их помощью были запущены первые искусственные спутники Земли, начались пилотируемые полёты, достигнута поверхность Луны и др.



*Рис. 40. Первый вариант Р-7, испытанный в 1957 году*



## 135 лет

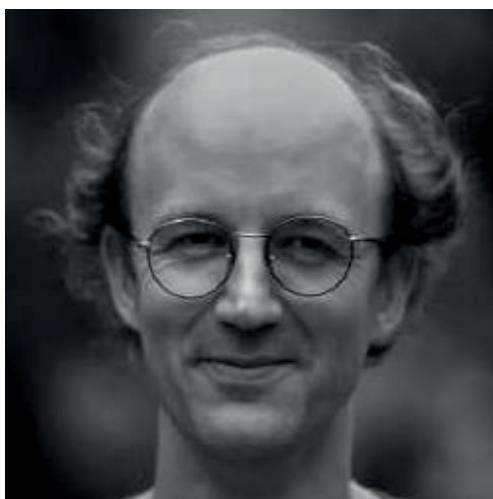
**23 августа 1887** года родился Фридрих Артурович Цандер (рис. 41). Его работы посвящены летательным аппаратам, ракетной технике, теории межпланетных полётов, реактивными двигателям, вопросам жизнеобеспечения экипажа в межпланетных космических перелётах. Цандер высказывал мысль, что крылатые ракеты, идею которых он запатентовал, должны стать средством осуществления межпланетных перелётов.



*Рис. 41. Ф.А. Цандер*

## 30 лет

**30 августа 1992** года был открыт первый транснептуновый объект в поясе Койпера. Объект (15760) 1992 QB<sub>1</sub>, названный позже (15760) Альбион, расположен на среднем расстоянии от Солнца около 43,7 а. е. и совершает один оборот вокруг него за 289 лет. Открытие сделали американские астрономы Дэвида Джуитта (рис. 42) и Джейн Лу (рис. 43) в обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях.



*Рис. 42. Д. Джуитт*



*Рис. 43. Д. Лу*

## СЕНТЯБРЬ

165 лет

**17 сентября 1857** года родился Константин Эдуардович Циолковский (рис. 44), основоположник теоретической космонавтики. Он проводил исследования по аэродинамике, соорудил воздуходувку (прототип аэродинамической трубы), рассматривал возможные применения дирижаблей, предложил использовать ракеты для межпланетных перелётов, предложил

идею «ракетных поездов» (прототип многоступенчатых ракет) и др., автор философских и фантастических произведений, вёл педагогическую деятельность.



*Рис. 44. К.Э. Циолковский*

## ОКТЯБРЬ

55 лет

**3 октября 1967 года** в Калуге открыт Государственный Музей истории космонавтики им. К. Э. Циолковского (рис. 45) — первый в мире и крупнейший в России музей космической тематики. Создан при непосредственном участии С. П. Королева и Ю. А. Гагарина.



*Рис. 45. ГМИК им. К.Э. Циолковского*

## 65 лет

**4 октября 1957 года** — начало космической эры. В СССР с полигона «Тюра-Там» (впоследствии названного космодромом Байконур) запущен первый в мире искусственный спутник Земли массой 83,6 кг и диаметром 58 см (рис. 46).



*Рис. 46. Сборка первого спутника*

## 40 лет

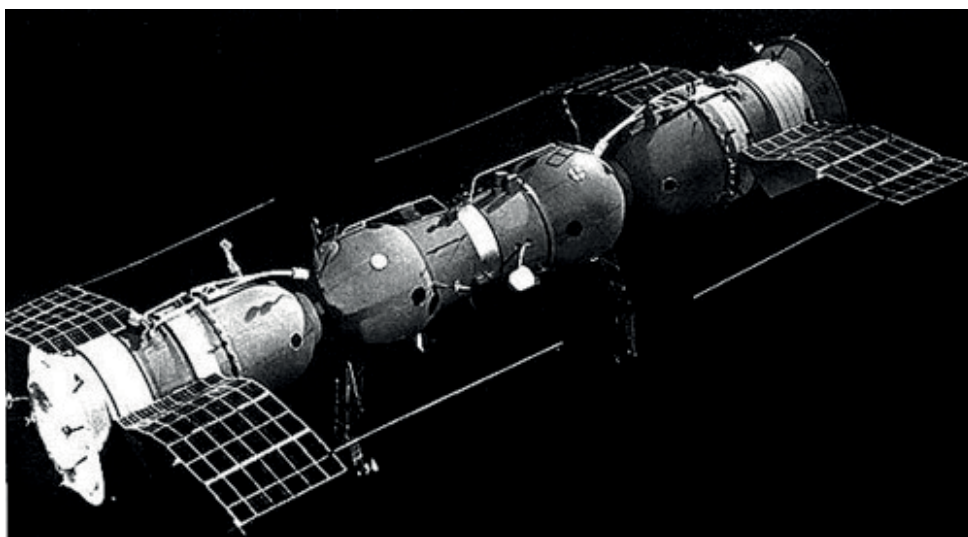
**12 октября 1982 года** в СССР выведен на орбиту первый спутник глобальной навигационной спутниковой системы — ГЛОНАСС (рис. 47). Созданная изначально для военных, система в настоящее время обеспечивает навигацию в любой точке Земли, передавая и гражданские сигналы. Основой системы являются 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трёх орбитальных плоскостях с наклоном орбитальных плоскостей  $64,8^\circ$  и высотой орбит 19 100 км.



*Рис. 47. Спутник системы ГЛОНАСС*

55 лет

**30 октября 1967 года** произведена на орбите первая в мире автоматическая стыковка двух советских беспилотных космических аппаратов «Космос-186» и «Космос-188» (рис. 48).



*Рис. 48. Стыковка спутников «Космос-186» и «Космос-188»*

# НОЯБРЬ

65 лет

**3 ноября 1957 года** в СССР на орбиту выведен второй искусственный спутник Земли, на борту которого в небольшом контейнере находилось живое существо — собака Лайка. Датчики регистрировали пульс, частоту дыхания, кровяное давление, температуру тела собаки. Лайка погибла от перегрева корабля, но её полёт показал возможность запуска на орбиту и нахождения в невесомости живых существ — так была проложена дорога в космос человеку.



*Рис. 49. Лайка — первая собака-космонавт*

55 лет

**6 ноября 1967 году** в Звёздном городке состоялось открытие Космического музея, созданного по инициативе Юрия Алексеевича Гагарина. Сегодня он является одним из крупнейших в России центров, сохраняющих документы по истории освоения космического пространства, и экспонирует личные вещи космонавтов и конструкторов ракетной техники, макеты кораблей, скафандры и другое снаряжение (рис. 50).



*Рис. 50. В одном из залов музея Звёздного городка*

## 140 лет

**22 ноября 1882 года** родился Яков Исидович Перельман (рис. 51) — учёный, публицист и популяризатор науки, написал книги «Занимательная физика», «Занимательная математика», «Занимательная астрономия» и многие другие, один из основоположников жанра научно-популярной литературы, автор понятия «научно-фантастическое», пропагандист идей К. Э. Циолковского.



*Рис. 51. Я.И. Перельман*

# ДЕКАБРЬ

35 лет

**26 декабря 1987 года** запущен первый спутник серии «Ресурс-Ф2» (рис. 52). Эти космические аппараты используются для дистанционного зондирования Земли в видимом диапазоне с высоким разрешением, составления топографических карт, контролем за сейсмической активностью, экологическим состоянием окружающей среды и др.



*Рис. 52. «Ресурс-Ф2» в музее Самары*

90 лет

В декабре **1932 года** американский физик и радиоинженер Карл Гуте Янский (рис. 53) сообщил об открытии космического радиоизлучения. Изучая радиопомехи от гроз и других





*Рис. 53. К.Г. Янский*

источников, мешающие радиосвязи, он заметил постоянный радиосум неизвестного происхождения, впоследствии отождествленный с Млечным Путём.




МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ  
**"ШКОЛА ЛЕКТОРОВ ПЛАНЕТАРИЕВ 2022"**  
И УЧЕБНОМУ ФИЛЬМУ  
**"ЗВЕЗДНОЕ НЕБО И ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ"**

Подписано в печать 07.02.2022.  
Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 17. Тираж 100 экз. Зак. № 026.



Отпечатано в типографии «Наша Полиграфия»,  
248009, Калуга, Грабцевское шоссе, 126.

 8 (4842) 77-00-75, +7 (910) 910-50-54

 [ilstrel@yandex.ru](mailto:ilstrel@yandex.ru)

 [nasha-poligrafia.ru](http://nasha-poligrafia.ru)