



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

АСТРОНОМИЯ ДЛЯ СТАРШИХ ШКОЛЬНИКОВ

СУРДИН
ВЛАДИМИР ГЕОРГИЕВИЧ

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ГИРЕНКО ЕЛЕНУ ЮРЬЕВНУ



Содержание

Урок 1. Астрономия и астрономы	6
1.1. Астрономическая наука в мире. Астрономия как профессия и хобби.	6
1.2. Работа астрономов	12
Урок 2. Объекты интереса астрономов	18
2.1. Типы астрономических объектов: галактики, звёзды, планеты, астероиды, кометы. Тёмное вещество и тёмная энергия	18
2.2. Общее представление об эволюции Вселенной	25
Урок 3. Оптические приборы	31
3.1. Свет и оптические приборы. Распространение, отражение и преломление света. Зеркало, линза и призма	31
3.2. Оптические объективы, их особенности и недостатки: сферическая и хроматическая абберации, кома, кривизна поля, астигматизм	37
Урок 4. Телескопы и обсерватории	43
4.1. История и принцип работы телескопа. Рефракторы, рефлекторы, зеркально-линзовые системы	43
Урок 5. Приёмники излучения. Влияние атмосферы и анализ излучения	54
5.1. Приемники излучения: глаз, фотопластинка, фотоэлемент, ФЭУ, ЭОП, ПЗС	54
5.2. Влияние земной атмосферы на оптические наблюдения. Астроклимат. Активная и адаптивная оптика	62
Урок 6. Радиоастрономия и телескопы в космосе	71
6.1. Радиоастрономия	71
6.2. Внеатмосферная астрономия	80
Урок 7. Излучение небесных тел. Звездные величины	87
7.1. Излучение небесных тел	87
7.2. Звездные величины	89
Урок 8. Спектры небесных тел. Эффект Доплера	95
8.1. Принцип работы спектрографа. Спектры излучения и поглощения	95
8.2. Эффект Доплера	101
Урок 9. Измерение пространства	107
9.1. Методы измерения расстояний в астрономии	107
9.2. Единицы расстояния в астрономии	113
Урок 10. Созвездия и координаты	115
10.1. Ориентация на небесной сфере	115
10.2. Точное положение объектов на небесной сфере	120
Урок 11. Измерение времени	125
11.1. Измерение времени – небесные объекты	125

11.2. Измерение времени: часовые механизмы.....	130
Урок 12. Время и навигация	134
12.1. Спутниковые системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и др.).....	134
12. 2. Измерение времени: время в быту (гражданское время), Всемирное время (GMT), декретное время, летнее и зимнее время, координированное время. Календарь.	136
Урок 13. Видимое движение небесных тел.....	142
13.1. Взаимные конфигурации планет	142
13.2. Видимое движение небесных тел.....	145
Урок 14. Законы Кеплера и физика Ньютона	152
14.1. Эмпирические законы Кеплера	152
14.2. Физические законы Ньютона.....	159
Урок 15. Космические полеты и черные дыры	163
15.1. Космические полеты и ракетная техника	163
15.2. Черные дыры – чистая гравитация	170
Урок 16. Приливы на Земле и в космосе	174
16.1. Приливный гравитационный эффект	174
16. 2. Приливы на Земле и в системах планета - спутник.....	176
Урок 17. Планеты Солнечной системы	183
17.1. Солнечная система: обзор и основные методы изучения	183
17.2. Солнечная система: основные группы объектов и их характеристика	190
Урок 18. Экзопланеты и поиск жизни во Вселенной	198
18.1. Экзопланеты. Методы поиска планетных систем у других звезд.....	198
18. 2. Разнообразие планетных систем. Зона возможной жизни.....	209
18.3. Поиски жизни и разума во Вселенной	212
Урок 19. Природа планет земной группы	213
19.1. Физические условия на поверхности планет. Атмосфера	213
19.2. Парниковый эффект.....	215
19.3. Планеты земной группы.....	217
Урок 20. Поиск жизни в Солнечной системе. Марс	225
20.1. Луна как запасная планета	225
20.2. Жизнь за пределами зоны жизни.....	226
20.3. Марс и его природа.....	227
Урок 21. Кольца и спутники планет. Малые тела Солнечной системы.....	233
21.1. Кольца и спутники планет. Планеты-спутники	233
21.2. Астероиды и кометы. Астероидно-кометная опасность	238
Урок 22. Метеоры и метеориты. Происхождение планет	243

22.1. Метеороиды, метеоры, метеориты	243
22.2. Происхождение и эволюция планетных систем	248
Урок 23. Звезды: характеристики и внутреннее строение	252
23.1. Основные измеримые характеристики звезд: масса, радиус, светимость, температура и химический состав поверхности.....	252
23. 2. Внутреннее строение и источники энергии звезд. Нейтринная астрономия	258
Урок 24. Солнце.....	264
24.1. Солнце – опасная звезда.....	264
24.2. Явления солнечной активности. Их влияние на Землю	268
Урок 25. Звезды: формирование и эволюция	272
25.1. Формирование и основные этапы эволюции звезд.....	272
25. 2. Поздние стадии эволюции звезд. Планетарные туманности	277
Урок 26. Релятивистские звезды и гравитационные волны.....	281
26.1. Белые карлики и нейтронные звезды	281
26.3. Гравитационно-волновая астрономия.....	288
Урок 27. Наша звёздная система – Галактика	293
27.1. Звездное окружение Солнца. Элементы динамики звездных систем.....	293
27..2. Общие характеристики Галактики. Межзвездная и межгалактическая среда.....	298
Урок 28. Многообразие галактик и проблема тёмного вещества	303
28.1. галактики и их морфология. Взаимодействующие галактики	303
28. 2. Местная группа галактик. Проблема скрытой массы (тёмная материя)	307
Урок 29. Группы и скопления галактик. Гравитационные линзы	310
29.1. Взаимодействие галактик в группах и скоплениях	310
29.2. Гравитационное линзирование и тёмная материя	314
Лекция 30. Структура Вселенной.....	316
30.1. Красное смещение спектральных линий и закон Хаббла. Крупномасштабная структура Вселенной	316
Урок 31. Рождение и юность Вселенной.....	324
31.1. Большой взрыв. Формирование вещества и реликтового излучения	324
31.2. Рождение галактик. Тёмная материя.....	328
Урок 32. Будущее Земли, Солнечной системы и Вселенной в целом	332
32.1. будущее Солнечной системы.....	332
32.2. Ускоренное расширение Вселенной. Тёмная энергия.....	337

Урок 1. Астрономия и астрономы

Владимир Георгиевич Сурдин – астроном; преподает астрономию в Московском Государственном университете имени М.В. Ломоносова и в некоторых других университетах (МФТИ, Новосибирский государственный университет и др.).

Настоящий курс рассчитан на школьников и школьных учителей – тех, которые хотят или уже преподают астрономию. Настоящий курс представлен шире, чем в школьных учебниках.

Курс не предполагает решение задач, а только охват астрономии со всех ее сторон.

1.1. Астрономическая наука в мире. Астрономия как профессия и хобби

Астрономы обычно работают на обсерваториях, в научных институтах или в университетах.

Астрономия – это уникальная специальность. Профессиональных астрономов в мире очень мало. Существует международная организация *International Astronomical Union* (Международный астрономический союз), которая объединяет всех астрономов на планете (не менее 15 000 человек). Но не только профессиональные астрономы изучают Вселенную, а еще и любители астрономии, которые подразделяются на разные уровни. У всех астрономов один предмет исследования, как, например, у каждого химика – своя лаборатория, свои химические реактивы, у каждого физика – свой ускоритель частиц или другие приборы, а у астрономов один объект – небо.

В настоящее время существуют такие разделы различных наук, как астрохимия, астробиология, астрофизика и т.д.

Владимир Георгиевич Сурдин работает в Государственном астрономическом институте имени Павла Карловича Штернберга (рис. 1.1.) – крупнейшем астрономическом учреждении России – более 200 профессиональных астрономов, лаборанты и сотрудники администрации. Профессиональных астрономов обучают на физическом факультете. По окончании факультета астрономы начинают работать в институте.

Государственный астрономический институт имени Павла Карловича Штернберга (ГАИШ) назван в честь профессора астрономии, который преподавал еще в Московском императорском университете до революции 1917 года, после участвовал в самой революции, разгроме белогвардейцев.

Подробнее о Сурдине Владимире Георгиевиче можно узнать на его странице: <http://Infm1.sai.msu.ru/~surdin/>.

В 2009 году было знаменательное событие. В этом году был организован международный год астрономии. Многие люди впервые увидели телескопы и стали смотреть на звезды. В разных городах мира были сделаны выставки с фотографиями звездного неба, чтобы люди, идя с работы домой, могли по пути насладиться этими

невероятными снимками Вселенной, которые они, возможно, никогда не видели. Самыми долгожданными гостями на выставках и мероприятиях были школьники, потому что они являются подрастающим поколением.



Рис. 1.1. Государственный астрономический институт имени Павла Карловича Штернберга (МГУ)

Так, например, в ГАИШ проводились ночи открытых дверей: в сентябре в хорошую погоду были приглашены все желающие – астрономы открывали свои телескопы и демонстрировали им звездное небо. Многие люди уходили за полночь – счастливые и воодушевленные.



Рис. 1.2. Ночи открытых дверей в ГАИШ



Рис. 1.3. Ночи открытых дверей в ГАИШ

Учебные материалы

Настоящий курс астрономии – регулярный. Для его прохождения необходимо два учебника (рис. 1.4, 1.5): Астрономия (Б.А. Воронцов-Вельяминов, Е.К. Страут) и Астрономия (В.М. Чаругин). Левый учебник – более старый, но содержит безупречную базу, хоть и устарел как школьное пособие. Правый учебник – более современный, написан в 2017 году В.М. Чаругиным. Этот учебник хоть и написан для школьного курса, однако он больше подходит для тех ребят, кто только начинает изучать эту науку.



Рис. 1.4. Учебник по астрономии (Б.А. Воронцов-Вельяминов, Е.К. Страут)



Рис. 1.5. Учебник по астрономии

Владимир Георгиевич Сурдин рекомендует учебник на рис. 1.6: Астрономия, учебно-методическое пособие авторов Язева С.А., Сотниковой Р.Т. и Климушкина Д.Ю. Этот учебник сложно найти в продаже, так как он распространяется только в Иркутске и в Иркутской области, поскольку пока не получил рекомендации в средние школы для обучения.

Действующий школьный учебник по астрономии (рис. 1.7), рекомендованный в 2019 году для обучения в средних школах, написан Засовым Анатолием Владимировичем и Сурдиным Владимиром Георгиевичем. В настоящее время, это стандартный школьный учебник по астрономии для 10-11 классов (на выбор). Этот учебник прошел апробацию.

Учебник (рис. 1.8) по астрономии был написан Сурдиным В.Г. для медицинских колледжей и училищ. Учебник вышел в 2021 году. Учебник содержит информацию для тех, кто склонен изучать «живые» объекты, например, космонавтов на орбитальных станциях, где совершенно особенные условия для жизни и работы, а также исследовать планеты как прибежище жизни и условия для жизни.



Рис. 1.6. Учебно-методическое пособие по астрономии (С.А. Язев, Р.Т. Сотникова, Д.Ю. Климущин)



Рис. 1.7. Учебник по астрономии (А.В. Засов, В.Г. Сурдин)

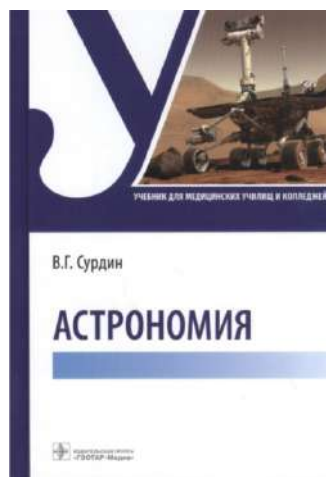


Рис. 1.8. Учебник по астрономии (В.Г. Сурдин)

Будущие профессиональные астрономы в университетах учатся по более специализированной литературе (рис. 1.9):

- Общий курс астрономии. Кононович Э.В., Морозов В.И.
- Астрономия. Популярные лекции. Сурдин В.Г.

Слева учебник, по которому обучаются студенты Московского государственного университета. Если у слушателей настоящего курса есть желание глубже погрузиться в темы уроков, ознакомиться с математикой, астрономическими методами, можно обратиться к данной литературе.

Справа учебник – «Астрономия. Популярные лекции». Учебник предназначен для студентов со всех курсов и используется как учебная литература в рамках межфакультетского курса по астрономии. Учебник содержит широкий обзор науки.



Рис. 1.9. Литература по астрономии

Существует серия книг «Астрономия и астрофизика» (рис. 1.10). На данный момент в серии 4 книги:

- «Небо и телескоп»;
- «Солнечная система»;
- «Звезды»;
- «Галактики».



Рис. 1.10. Серия книг «Астрономия и астрофизика»

Книга «Разведка далеких планет» В.Г. Сурдина оказалась очень удачной и выиграла конкурс «Просветитель», который проводится каждый год в нашей стране на деньги спонсоров и где выбираются лучшие научно-популярные книги.



Рис. 1.11. Книга «Разведка далеких планет» (автор: Сурдин В.Г.)

Преподаватель к литературе рекомендует также решать задачи по сборникам:

- «Вселенная в вопросах и ответах» (Сурдин В.Г.);
- «Астрономические олимпиады» (Сурдин В.Г.).

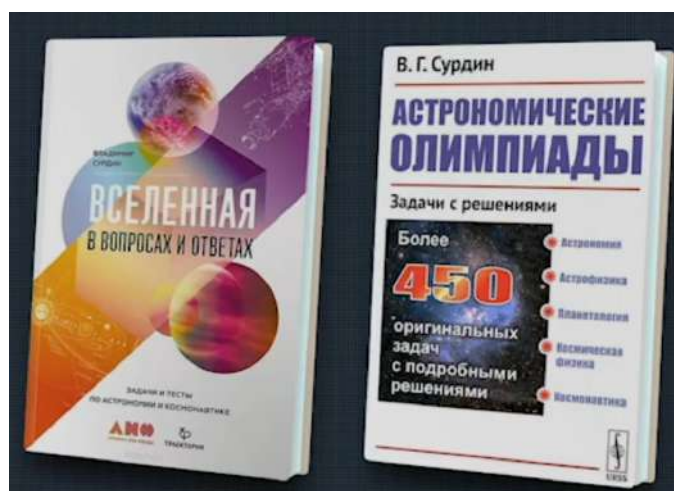


Рис. 1.12. Сборник задач по астрономии (автор: Сурдин В.Г.)

Во всех задачниках есть подробные решения. Левый задачник более простой, более современный и содержит множество тестов с вариантами ответа.

Более 70 лет в России проводится астрономическая олимпиада для школьников. Это была первая в мире астрономическая олимпиада. Победители всероссийской астрономической олимпиады могут поступить на направление астрономии в МГУ без экзаменов.

Программы

Существует программа, созданная астрономом Александром Волынкиным: астрономическая программа *Turbo Sky* (рис. 1.13). Владимир Георгиевич Сурдин рекомендует установить эту программу. Программа крайне простая. В ней можно

посмотреть, какие объекты находятся на небе. Программа не требует особых требований к процессору компьютера, поэтому установится на любой ПК.

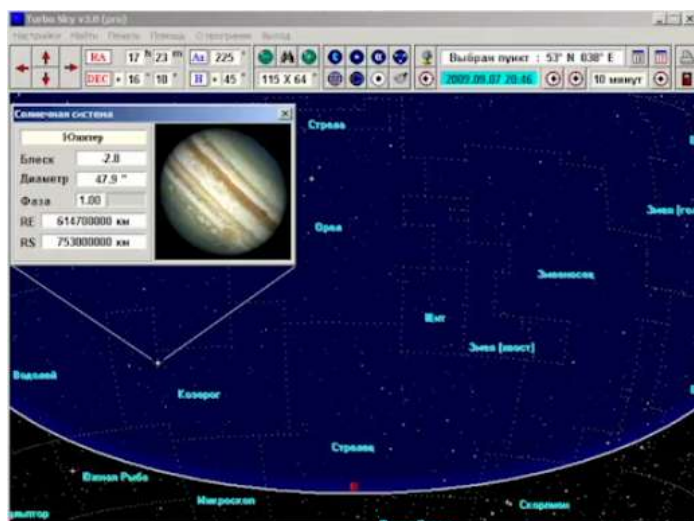


Рис. 1.13. Астрономическая программа Turbo Sky

Существует более мощная и информативная программа: персональный планетарий «Stellarium free». Онлайн версия: <https://stellarium-web.org>.



Рис. 1.14. Персональный планетарий «Stellarium free».

1.2. Работа астрономов

Специализированным местом, в котором работают астрономы, может быть обсерватория (рис. 1.15). Как правило, обсерватории строят в горах, поскольку там чистый воздух и нет близлежащих населенных пунктов, которые включают яркое освещение и засвечивают небо. Но еще лучше подняться как можно выше, над атмосферой: для этого используются космические телескопы. Их очень мало, так как они очень дорого стоят. Через несколько лет большой российский телескоп должен отправиться в космос. В настоящее время все астрономы мира пользуются

космическим телескопом «Хаббл» (рис. 1.16), созданным американскими и европейскими инженерами.



*Рис. 1.15. Специальная
астрофизическая обсерватория
РАН*



Рис. 1.16. Космический телескоп «Хаббл»

Любители астрономии не имеют доступа к крупным космическим телескопам, но даже с маленькими телескопами можно и необходимо делать интересные и полезные для науки наблюдения, исследовать небо. Ведь каждый профессиональный телескоп может исследовать только небольшой кусочек неба, а «армия» любителей астрономии позволяет изучить небо со всех его сторон и не пропускать важные события и объекты. Как примеры – это астероиды и кометы.

Астрономы работают на обсерваториях. Обсерватория – это не только купол, где стоит телескоп, а еще и все учреждение, в котором много телескопов, мастерских, служб, столовых, мест для жилья.

На рис. 1.19 показана иллюстрация 19 века, которая изображает в аллегорической форме как человек всегда хотел прорваться сквозь купол неба, выйти за его пределы.

Астрономы, которые работают в городах не имеют возможности в городе заниматься наблюдениями неба. Но иногда это происходит. На рис. 1.20 видно, что на крыше института расположены небольшие башни с телескопами, а также телескопы расположены в саду. Однако такой крупный город, как Москва, не позволяет проводить тонких наблюдений.



Рис. 1.17. Любители астрономии



Рис. 1.18. Обсерватория



Рис. 1.19. Иллюстрация 19 века



Рис. 1.20. Государственный
астрономический институт им. П.К.
Штенберга (МГУ)

На рисунке 1.21 показана одна из лучших европейских обсерваторий. В Европе довольно мало мест для исследования неба из-за ее густонаселенности. Однако на юге Франции, на границе с Испанией, есть гора Пик-дю-Миди, где еще в 19 веке французские астрономы построили обсерваторию.

Если рассмотреть нашу планету ночью взглядом (рис. 1.22), можно сразу выделить места, в которых астрономы работать не смогут. Яркость ночного освещения на карте указывает на высокую плотность населения. Звезд не видно в больших городах, они видны вдали от городов (на расстоянии 30-40 км). Если уехать в высокогорную пустыню, то можно увидеть по-настоящему фантастическое небо.

В Европе немало обсерваторий: одна из них – астрономическая обсерватория «Сфинкс» в Альпах (рис. 1.24). Построить такое научное учреждение нелегко. Телескопы, находящиеся в этой обсерватории не очень крупные.



Рис. 1.21. Обсерватория Пик-дю-Миди, Франция



Рис. 1.22. Наша планета ночью



Рис. 1.23. Европа ночью



Рис. 1.24. Астрономическая обсерватория «Сфинкс», Альпы, перевал Юнгфрауйох, Швейцария. Высота 3571 м.



Рис. 1.25. Астрономическая обсерватория «Сфинкс», Альпы, перевал Юнгфрауйох, Швейцария. Высота 3571 м.

Наиболее привлекательные для астрономов места находятся в старых горах, где вершины не такие крутые и можно проложить дорогу. Одна из них находится в Чили: сухие горы – это очень важно, так как если нет паров воды в атмосфере, то свет легко проходит из космоса к поверхности Земли.



Рис. 1.26. Обсерватория Пик-дю-Миди, Пиренеи, 2865 м



Рис. 1.26. Европейская южная обсерватория. Чили

В европейской обсерватории в Чили находятся крупнейшие телескопы мира. В каждой из башен находится телескоп диаметром более 8 м. Это очень дорогие и сложные приборы. Здесь лучшие астрономы мира наблюдают далекие звезды и галактики (рис. 1.28).



Рис. 1.27. Обсерватория Пик-дю-Миди, Пиренеи, 2865 м



Рис. 1.28. Галактика Мессье 51

Кроме обсерваторий на Земле существуют летающие обсерватории на борту самолета. Во время полета в самолете открывает окно, где установлен телескоп. В окне нет никаких стекол. Диаметр такого инфракрасного телескопа составляет 2.5 метра.

Еще удобнее изучать звездное небо из космоса. Для этого все астрономы мира используют космический телескоп «Хаббл», однако это крайне дорого. Кроме того, телескоп нелегко чинить. Одним из снимков космического телескопа является крабовидная туманность (рис. 1.31) в созвездии Телец.

Иногда астрономам мешают некоторые вещи. На рисунке 1.32 показана туманность Андромеды (соседняя галактика). Белые линии на фотографии – самолеты и спутники. С помощью компьютерных технологий можно убрать эти линии. Но вместе с этим, можно стереть и изображения звезд. Астрономы попросили спутники Илона Маска окрасить их в черный цвет.



Рис. 1.29. Летающая обсерватория
SOFIA (NASA/DLR)



Рис. 1.30. Космический телескоп
«Хаббл»



Рис. 1.31. Крабовидная туманность,
Мессье 1



Рис. 1.32. Туманность Андромеды



Рис. 1.33. Спутники системы Starlink Илона Маска. Прямой космический интернет

Яркий лунный свет так же мешает астрономам изучать звездное небо. В полнолуние рассеянный в атмосфере свет Луны мешает наблюдать звезды и особенно галактики.

Именно поэтому новолуние – самый благоприятный период для астрономических наблюдений. В полнолуние астрономам приходится ждать, когда Луна «пойдет на ущерб».

Урок 2. Объекты интереса астрономов

Второй урок посвящен тому, чем занимаются астрономы: объектам интереса астрономов. На первом уроке преподаватель познакомил читателя/слушателя с самими астрономами: что это за специальность, где астрономы работают – в каких обсерваториях, институтах, университетах; какие места предпочтительны для работы и наблюдения неба, а что мешает (например, присутствие больших густонаселенных городов вблизи обсерваторий).

Когда астроном выходит вечером, готовясь к наблюдениям, первым делом он поднимает голову наверх и утверждает: «Небо ясное» или «Неба нет». Для астронома небо – это безоблачная, чистая, прозрачная атмосфера, сквозь которую виден космос.

2.1. Типы астрономических объектов: галактики, звёзды, планеты, астероиды, кометы. Тёмное вещество и тёмная энергия

Все космические объекты (и естественные, и искусственные) представляют интерес для астрономов. Специалистам необходимо наблюдать за спутниками/космическими станциями, исследовать их траекторию движения, проводить расчеты их будущих орбит.

Ночное небо

В этом разделе будет описано, что мы можем увидеть на ночном небе и изучить. Прежде всего – это *звезды*. Раньше казалось, что космос – это мир звезд. Ведь действительно, взглянув на небо, можно было увидеть только звезды и иногда Луну, или одну – две планеты. Оказалось, что наш мир состоит в основном не из звезд, не из планет, а из загадочных вещей, которые были совсем недавно обнаружены, но еще не исследованы и не осмыслены, например: темная материя (темное вещество), темная энергия. Темные они потому, что их действительно не видно. Их присутствие невозможно зафиксировать ни в виде света, ни в каких-то частиц. Поэтому звезды остаются главным объектом изучения, которые рассказывают о том, что во Вселенной существуют и другие сущности. Изучать звезды означает понять их природу, и с их помощью понять природу того, что мы пока не можем обнаружить в явном виде.



Рис. 2.1. Звездное небо

Планеты Солнечной системы

В нашей Солнечной системе (рис. 2.2.) суммарная масса всех планет чуть больше 0,001 доли массы Солнца, и так почти во всех планетных системах: рядом со звездой планеты – это почти незаметная вещь, но важная! В нашей Солнечной системе можно жить только на поверхности планет, притом не каждой. Только на Земле существуют комфортные условия для жизни человека и других живых существ. Возможно, в будущем будут найдены условия жизни и на Марсе или в облаках Венеры.



Рис. 2.2. Планеты Солнечной системы

На рисунке 2.2 все восемь планет представлены в одном масштабе: можно оценить, насколько одни планеты крупнее других. Так, существует два газовых гиганта (Сатурн и Юпитер). Юпитер – самая крупная планета в нашей Солнечной системе. Он один больше всех остальных планет и составляет 0,001 долю массы Солнца. Сатурн – меньше Юпитера по массе примерно в 4 раза. Также гигантскими, но не такими, как Сатурн и Юпитер, считаются Уран и Нептун – ледяные гиганты, так как вещество на этих планетах не в газообразной форме, а в жидко-льдиистой. В нашу Солнечную систему помимо планет гигантов входят и *планеты Земной группы*: Марс, Земля, Венера, Меркурий. Планеты можно разделить на «похожие на Землю» (Земля, Венера) и «непохожие» (Марс и Меркурий). Таким образом видно, что наша планетная система устроена симметрично: два газовых гиганта, два ледяных гиганта и планеты Земной группы. Особняком в нашей Солнечной системе находится Солнце, масса которого составляет 99,9% массы нашей Солнечной системы. Кроме планет есть еще астероиды и кометы – их миллионы в Солнечной системе.

Спутники планет

Почти у каждой планеты есть спутники. Их нет только у Меркурия и Венеры.

В число спутников входит и спутник Земли – Луна (рис. 2.3). Луна очень велика по сравнению с другими спутниками. В то время как спутники других планет (планет-гигантов) являются микроскопическими в сравнении, Луна в 3,5 раза меньше Земли и в 81 раз меньше по массе. Это сопоставимые вещи. До Луны можно долететь за 3 дня. Считается, что на Луне и появятся первые научные внеземные лаборатории, обитаемые и пилотируемые (с присутствием человека).



Рис. 2.3. Луна

Несмотря на то, что Луну исследуют уже достаточно долго: и роботами, и людьми, и в телескопы, до сих пор не существует надежной теории ее происхождения. Однако есть несколько конкурирующих теорий, которые по-разному объясняют происхождение Луны. А если есть несколько, значит пока ни одна теория не полно и не надежно описывает его.

На рисунке 2.4 показан спутник Юпитера – *Ио*. Ио размером почти с Луну. Цвет спутника можно сравнить с цветом апельсина, потому что вся его поверхность покрыта соединениями серы. Самородная сера, которую можно найти в гейзерах или на склонах вулканов, имеет желтовато-оранжевый цвет. На поверхности спутника действуют множество огромных вулканов, постоянно действующих. Почему вся поверхность Ио покрыта действующими вулканами, а на Луне такого нет – остается на данный момент неизвестным фактом. Существуют определенные соображения. На Ио очень высокий уровень космической радиации, поэтому человек вряд ли отважится туда полететь. Однако для автоматов это не очень опасно, поэтому роботы, вероятно, смогут добраться и исследовать поверхность Ио более детально.

Существуют небольшие спутники планет, такие как *Гиперион* (рис. 2.5) – спутник Сатурна. У него неправильная форма (не округлая), потому что он маленький – размером около 500 км, очень маломассивный. На Гиперионе слабая гравитация, и она не может округлить его, он больше похож на кусок пемзы или морскую губку. Этим он и интересен: его плотность в 2 раза меньше плотности воды, а в основном он состоит

из водяного льда. Из этого следует, что внутри он наполовину пустой. Интересно узнать, что это за пустоты. На спутнике нет радиации.

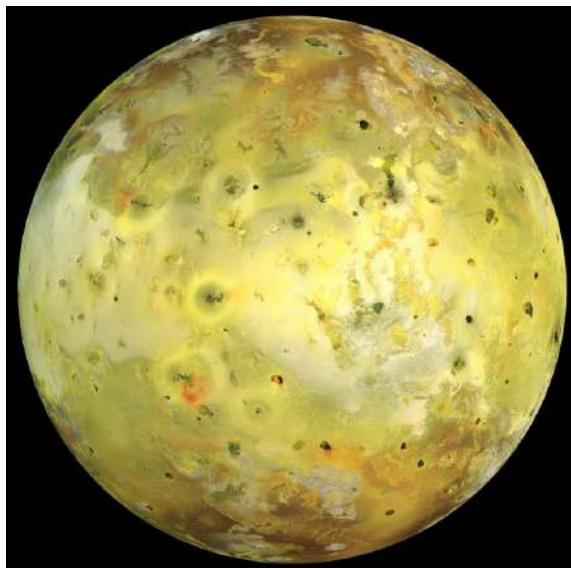


Рис. 2.4. Ио – спутник Юпитера

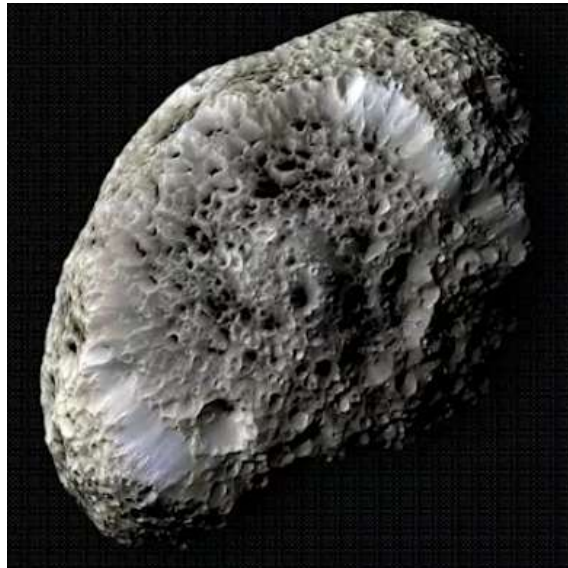


Рис. 2.5. Гиперион – спутник Сатурна

Спутник Сатурна – Титан – это один из двух крупнейших спутников в Солнечной системе. По размеру он больше Меркурия. Голубая тонка оболочка – это атмосфера, именно такого газового состава, как у нашей планеты. Атмосфера Земли состоит на $\frac{3}{4}$ из азота и на $\frac{1}{4}$ из кислорода. У Титана же атмосфера почти чисто азотная, кислорода там нет, человек не смог бы там дышать, но и отравиться этой атмосферой не мог бы, потому что азот – безопасный для человека газ. Сила тяжести на поверхности Титана очень низкая, в 7 раз меньше, чем на Земле. В этой плотной атмосфере при низкой силе тяжести человек бы мог там летать. Однако температура на поверхности Титана -180 градусов. На Титане так же нет радиации. Теоретически, на поверхности Титана можно работать и жить. На Титан однажды летал аппарат, который смог проработать там 2 часа, так как аккумуляторы были не очень объемные. На Титане есть также моря и океаны, которые состоят не из воды, а из замерзших природных газов (метан, пропан, бутан и т.д.). Не исключено, что на Титане существуют оригинальные формы жизни.

Астероиды

Астероиды – небольшие каменные тела размером в километры, десятки и иногда сотни километров. Самый крупный астероид размером 500 км в диаметре. К некоторым из них подлетали космические аппараты. Одним из таких астероидов, исследованных вблизи, является астероид Итокава (рис. 2.7). Рядом с ним побывал Японский космический зонд.

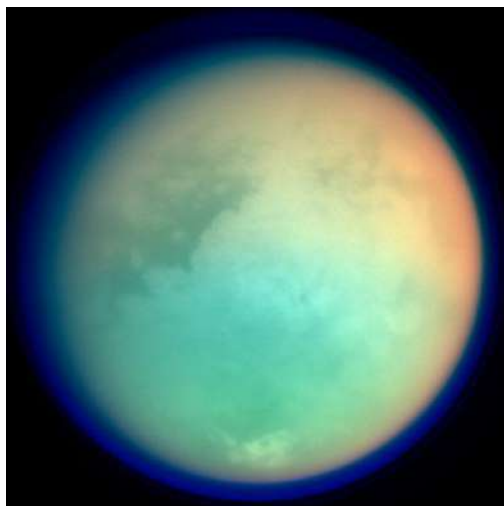


Рис. 2.6. Титан – спутник
Сатурна

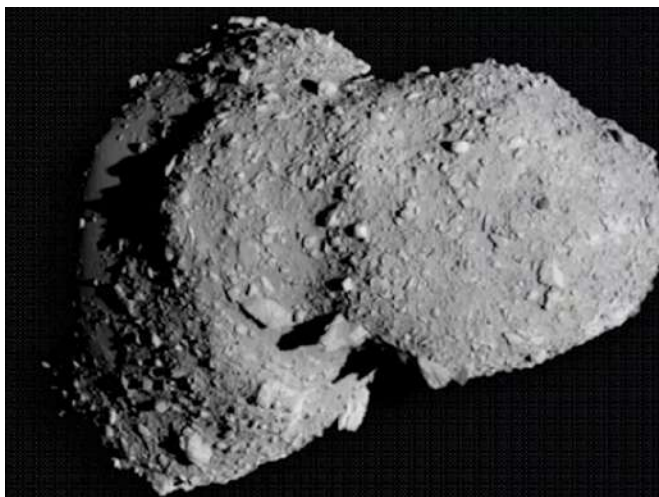


Рис. 2.7. Астероид Итокава

Кометы

Кометы – небольшие, но не каменистые, а скорее льдистые тела. Они в большей степени состоят из замерзшей воды и других легко испаряющихся веществ: углекислого газа, метана. По этой причине кометы могут летать вдали от Солнца, там, где холодно. Если кометы подлетают к Солнцу, то нагреваются его лучами и газ начинает испаряться.

На рисунке 2.8 показано ядро кометы Чурюмова-Герасименко. Эту комету открыли в 1969 году. Несколько лет назад к ней впервые подлетел европейский космический аппарат Розетта и детально исследовал эту ледяную глыбу.

Звездные галактики

Галактика, в которой мы живем на английском языке называется *Milky way*, в России употребляют только слово Галактика – с большой буквы, чтобы не перепутать с другими галактиками. Одна из них показана на рисунке 2.9 – галактика в созвездии Андромеды. В каталогах у астрономов эта галактика носит название Мессье 31. Каталог составлен французским Шарлем Мессье.

В галактиках есть звезды, рядом с ними планеты. Между звезд – не пустота, а очень разреженная газо-пылевая среда, которую называют межзвездной средой. В некоторых местах она уплотняется и создает плотные облака. Если рядом с этими облаками существуют яркие горячие звезды, то они нагревают своими лучами этот газ и он начинает светиться. На рисунке 2.10 показана Туманность Ориона. Глазом ее видно не очень отчетливо, только в холодную темную ясную ночь можно увидеть под поясом Ориона размытое пятно – это и есть туманность Ориона, а в телескоп ее видно особенно хорошо: там из газа формируются новые звезды. В центре туманности находятся четыре мощные горячие новорожденные звезды, которые своим теплом разогрели окружающий газ до 8000 градусов и светятся в оптическом диапазоне.

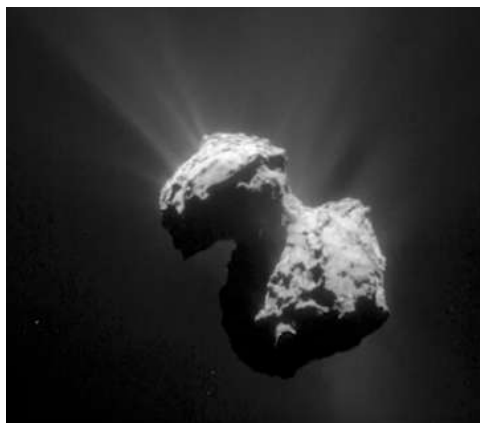


Рис. 2.8. Комета 67P/Чурюмова-Герасименко



Рис. 2.9. Галактика в Андромеде (Мессье 31)



Рис. 2.10. Туманность Ориона (Мессье 42)

Если рядом с газовым облаком нет горячей яркой звезды, газ остается холодным, в нем конденсируются твердые частицы, которые условно называются космическими пылинками. Они хорошо поглощают свет далеких звезд, поэтому астрономы их наблюдают как черные «заплатки», «экраны» на фоне звездного неба – это темные холодные газово-пылевые облака (рис. 2.11).

Если невидимая темную материю можно было бы представить, то выглядела бы она примерно как на рисунке 2.12. На данный момент ни астрономы, ни физики не могут сказать, что это такое.



Рис. 2.11. Межзвездная пыль



Рис. 2.12. Темная корона галактики

Мир галактик устроен иерархически. Они не случайно разбросаны во Вселенной, а живут коллективами: иногда по 2-3, иногда по 23. Такие области называют *группами галактик*. Если галактики формируются десятками/сотнями/тысячами, то такие области называют *скоплениями*.

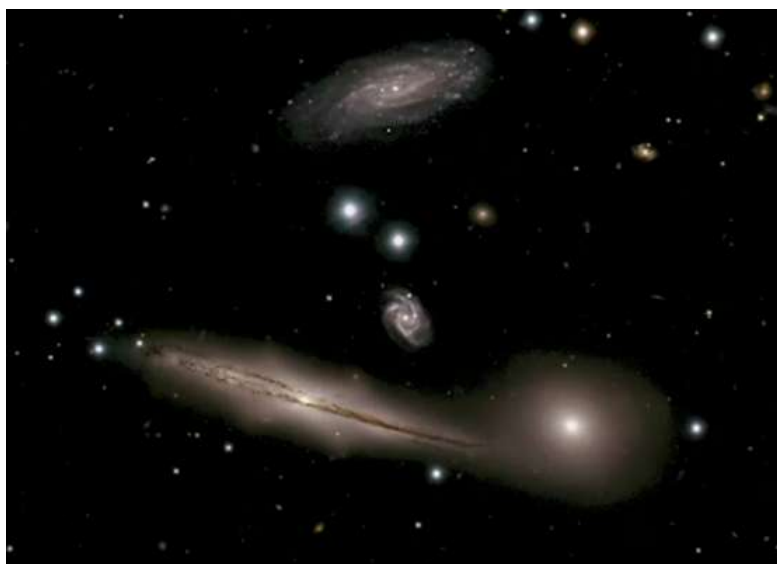


Рис. 2.13. Скопление галактик

Рассмотрим схему на рисунке 2.14, чтобы понять из чего состоит Вселенная. Круговая диаграмма была построена в самые последние годы и ошеломила всех астрономов: около 5% нашей Вселенной приходится на долю планет, звезд, межзвездного вещества, части и квантов света – вещей, природу которых мы понимаем. 27 % приходится на темное вещество (*dark matter*) и 68% на темную энергию. Происхождение темной энергии неизвестно. Темная энергия проявляет себя загадочным образом. То, что раньше было только в фантастических романах, например, антигравитация, на самом деле, является свойством темной энергии. Темная энергия обладает свойством всемирного отталкивания. Это и фантастика, и реальность.



Рис. 2.14. Состав Вселенной

2.2. Общее представление об эволюции Вселенной

Вторая часть урока посвящена тому, как сегодня астрономы представляют эволюцию нашего мира: с чего все началось, как все происходит.

При изучении Вселенной часто говорят о Большом взрыве, имея в виду, что был момент в прошлом, когда вещество было сильно сжато и неожиданно начало расширяться. Картинка на рисунке 2.15 очень неточна, потому что наводит на неправильные представления тех, кто впервые изучает этот вопрос. Слово «взрыв» вызывает ассоциации, как взрыв гранаты, бомбы, надутого воздушного шарика. Это неверно. Сегодня ученые понимают, что Вселенная в нашу эпоху однородна. В прошлом Вселенная была еще более однородна: не было ни звезд, ни галактик, ни планет. Она была заполнена веществом, плотным горячим газом и была всюду одинакова. Взрыва не было – был *момент времени*, который и называется большим взрывом, в который плотное вещество начало расширяться в разные стороны («всё от всего»).

Проще всего этот процесс понятен математикам, так как они умеют работать с бесконечностью.

Эффект Доплера

Для изучения того, как именно эволюционирует Вселенная, как разлетаются галактики, используют свет (рис. 2.16).

К счастью, свет о многом может рассказать. Согласно *эффекту Доплера*, имеет место изменение цвета световой волны: если источник света движется и удаляется от наблюдателя – то свет краснеет, если приближается к наблюдателю – спектральные линии смещаются в голубую сторону, свет становится более коротковолновым. Именно эффект Доплера позволил в начале 20 века астрономам (среди них и Э. Хаббл) измерить

расстояние до галактик (рис. 2.18) и скорости движения галактик. Оказалось, что существует линейная зависимость: чем дальше галактика, тем быстрее она от нас удаляется (*Закон Хаббла*).

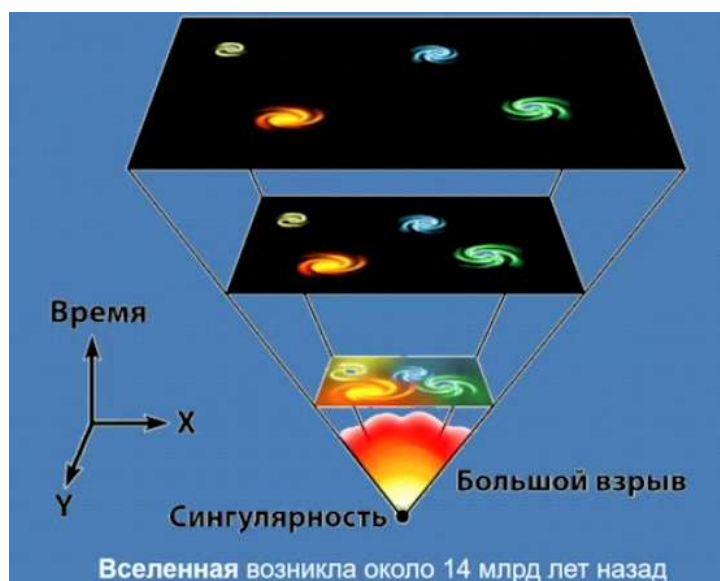


Рис. 2.15. Возникновение Вселенной

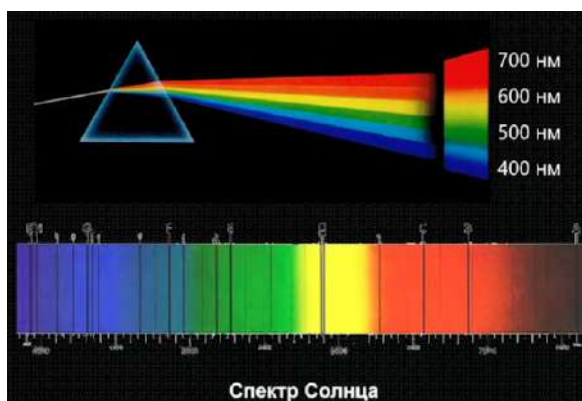


Рис. 2.16. Спектральный анализ света

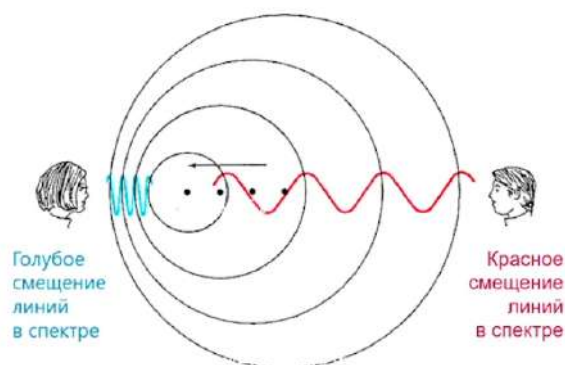


Рис. 2.17. Эффект Доплера

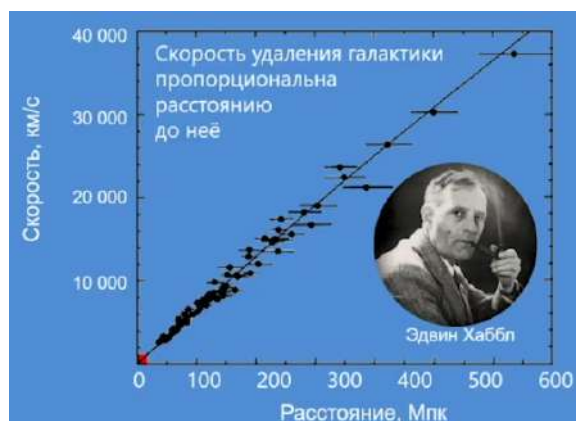


Рис. 2.18. Закон Хаббла

Такой линейный закон расширения говорит о том, что всё от всего улетает (рис. 2.19): все окружающее от каждой точки. Таким образом, раз в настоящее время все разлетается, значит в прошлом все было более плотно и потом начало расширяться во все стороны. Аналогия, показанная на рисунке 2.20 – неверна.

Главный вопрос в том – было ли расширение горячим в начале или холодным. Холодное расширение тоже существует. Все может разлетаться, если дать этому начальный импульс. Что именно заставило двигаться вещество в начале Большого взрыва – неизвестно. Однако точно известно, что взрыв был горячим.

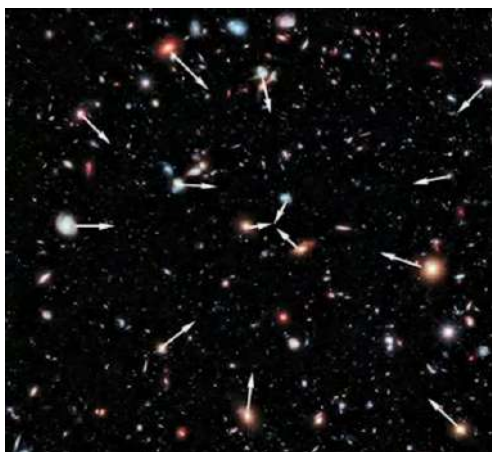


Рис. 2.19. Линейный закон расширения



Рис. 2.20. Горячий взрыв

Самая простая модель – это воздушный шар (рис. 2.21). Как именно происходит расширение показано на рисунке 2.22 – существует много математических представлений: либо две галактики притягиваются друг к другу, либо какая-то сущность отталкивает их. Похоже, что наша Вселенная устроена как ускоренное расширение, обеспеченное антигравитационным влиянием темной энергии.



Рис. 2.21. Модель расширения Вселенной



Рис. 2.22. Сценарии эволюции Вселенной

Карты реликтового излучения

Глядя на далекое прошлое, можно увидеть когда Вселенная была молодой и горячей, была заполнена горячей плазмой и светилась. Сегодня с помощью специальных космических телескопов, летающих на спутниках, получены карты

реликтового излучения. Чем дальше в пространстве мы смотрим, тем дольше идет свет – тем дальше мы наблюдаем прошлое (13,5 млрд лет назад).

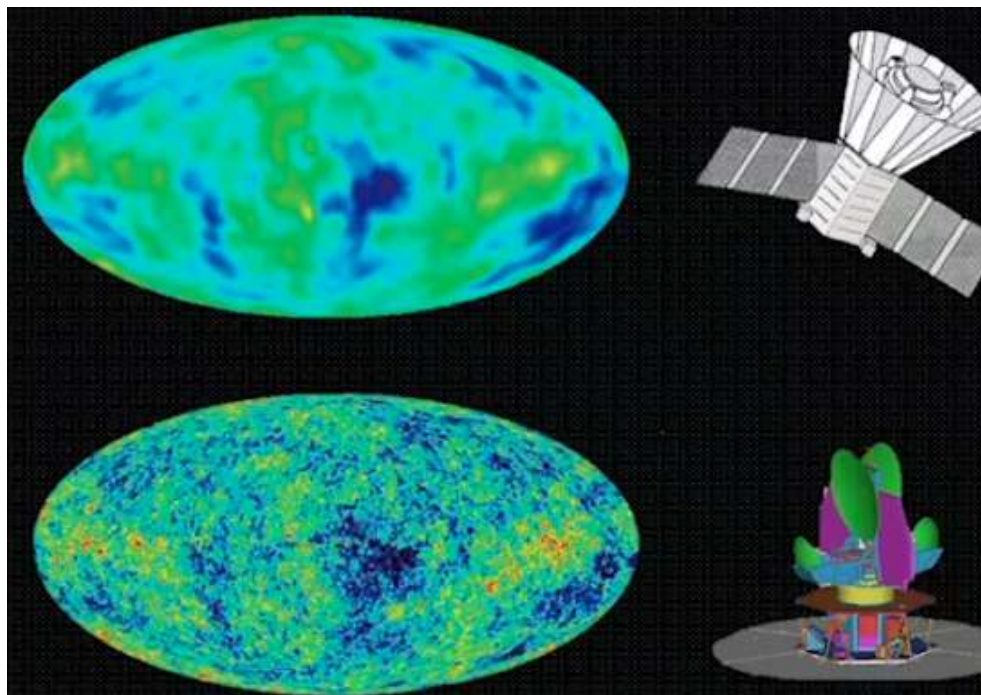


Рис. 2.23. Карта реликтового излучения

Вселенная постепенно из почти однородной при расширении становилась все более структурированной.

Сначала галактики были маленькие. Телескоп Хаббл способен увидеть те самые первые галактики. Потом галактики встречались друг с другом, слипались. Наша галактика – результат слипания сотен галактик. Внутри галактик в результате иерархического структурирования материи формируются звезды.

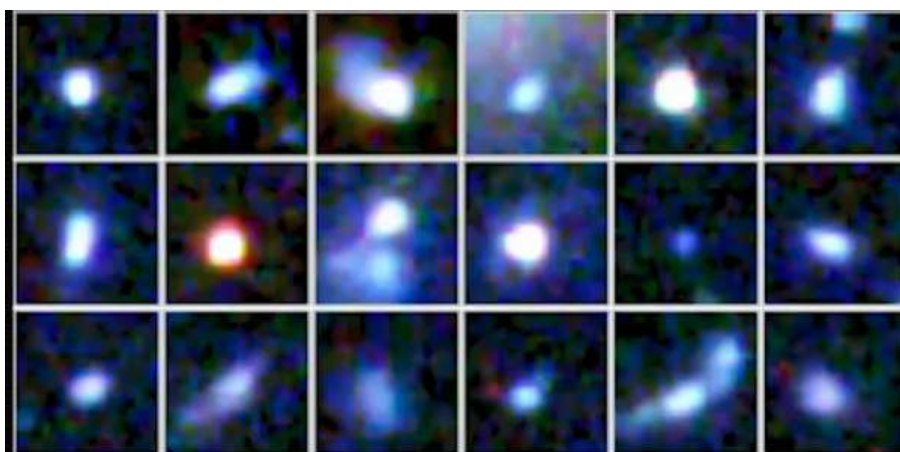


Рис. 2.24. Первые галактики в молодой Вселенной

Рядом со звездами из небольшого количества оставшегося вещества (протопланетного) формируются планеты. Такие рисунки еще недавно фантазировали и представляли в учебниках.



Рис. 2.25. Формирование планет

На рисунке 2.26 показано Солнце-гигант и наша галактика – Солнечная система в едином масштабе.

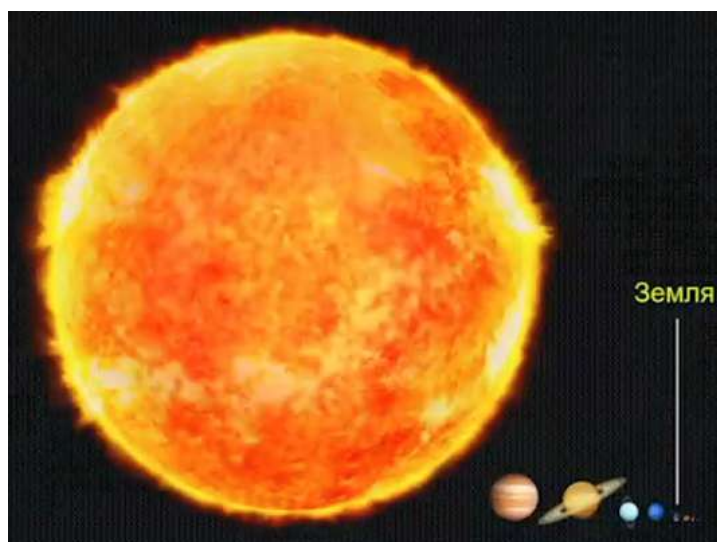


Рис. 2.26. Солнечная система в едином масштабе

Эволюция Земли

На рисунке 2.27 показана наша Земля в прошлом, настоящем и будущем. Через несколько миллиардов лет на поверхности Земли ни останется ни воздуха, ни воды и Земля потеряет свои качества.



Рис. 2.27. Эволюция Земли

Солнце со временем испытает судьбу всех звезд. Звезды, похожие на Солнце, но постаревшие раньше него, умирают – от них остается остывшее ядро (планетарная туманность).

Урок 3. Оптические приборы

В уроке №3 будет рассказано о том, какими приборами пользуются астрономы в своей работе. Безусловно, это телескопы. Но сегодня одно слово «телескоп» не описывает то многообразие приборов, которыми пользуются современные астрономы и астрофизики для изучения Вселенной.

3.1. Свет и оптические приборы. Распространение, отражение и преломление света. Зеркало, линза и призма

Телескоп, как правило, оптический. Так же, как через наши глаза проходит 90% информации в наш мозг, сквозь оптический телескоп проходит примерно 90% информации о нашей Вселенной.

Оптика

Оптика – это искусство управления светом (рис. 3.1.). Необходимо научиться направлять свет в разные стороны, фокусировать его, делить на части, анализировать его состав. В этом и состоит работа оптиков и астрономов, которые пользуются приборами.

Задачи оптики:

1. Различать мелкие детали.
2. Замечать тусклые объекты.

Для этих задач существуют бинокли, которые собирают много света и направляют его в глаз человека.

Приборами, которыми оптика может оперировать, могут являться экран, зеркало, призма или линза. Изменять направление света или расщеплять его на составные цвета можно с помощью призмы и линзы (рис. 3.2).

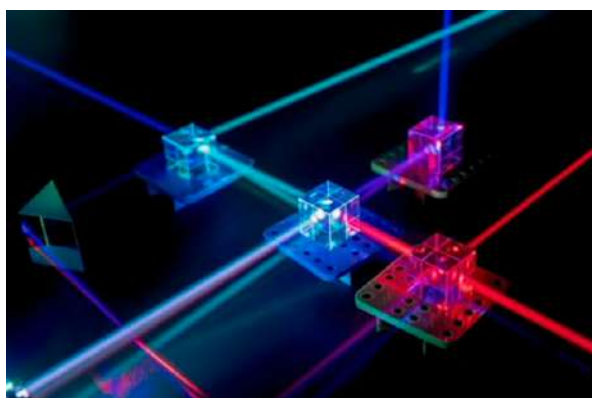


Рис. 3.1. Оптика, как искусство управления светом

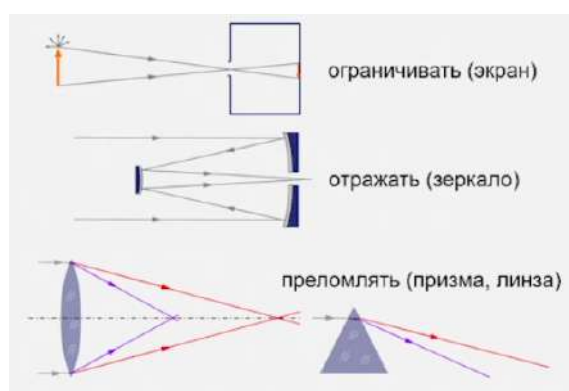


Рис. 3.2. Управление светом

Самый простой прибор – это камера Обскура (рис. 3.3), темная коробка с небольшим отверстием, через которое проникает свет. Один луч света проникает в коробку и попадает на экран, все остальные лучи отсечены. Тогда на экране

отобразится изображение объекта. Иногда люди случайно создают камеру Обскура: в летний солнечный день зашторивают плотными шторами окно, и если между шторами остается маленькая щель, то на противоположной стене комнаты можно увидеть изображение улицы. Камерой Обскура пользовались уже очень давно. Для того, чтобы получить изображение объекта с помощью маленького отверстия, необходимо, чтобы объект был ярким. Самый яркий объект – это Солнце. Изображение Солнца или очень ярко освещенного ландшафта или улицы можно получить в камере Обскура. До изобретения фотографии камерой-обскурой пользовались художники, чтобы точно нанести схему картины. С помощью нее можно было сохранить геометрические линии и перспективы. В наше время ей пользуются только в том случае, если не удастся использовать призмы, зеркала и линзы. Например, если необходимо создать изображение в рентгеновских или гамма-лучах. Но это дает не очень четкую картину.

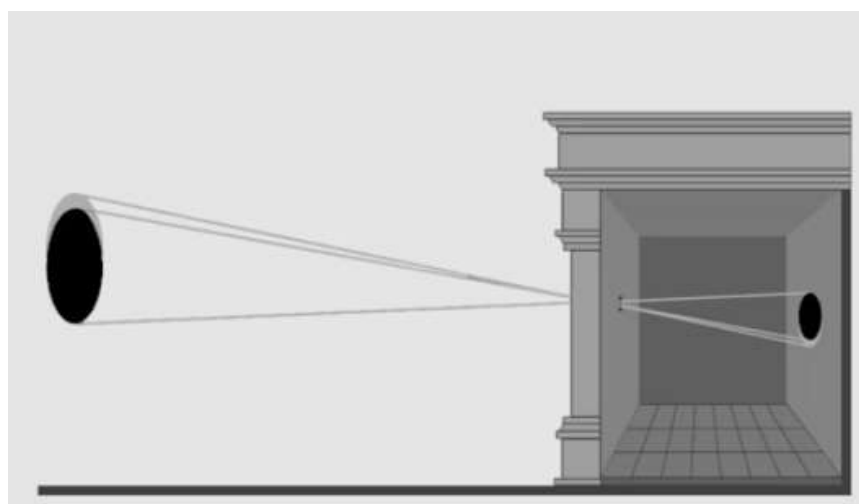


Рис. 3.3. Камера Обскура

Более четкую картину может дать использование зеркал и прозрачных тел (линз и призм). На рисунке 3.4 показаны законы отражения и преломления светового луча. В оптике угол падения равен углу отражения. В прозрачных средах работает закон Снеллиуса о связи угла падения и угла преломления:

$$n \sin i = n' \sin i',$$

где n – коэффициент преломления в верхней среде, n' – коэффициент преломления в нижней среде. Отношение синуса углов падения и преломления равно отношению скоростей в этих средах. Используя этот элементарный закон, можно создать бесконечное количество оптических приборов. Самые известные – это линзы (рис. 3.5), которые используются в очках, лупах или в биноклях/телескопах. Линзы бывают разного типа:

- плосковыпуклые;
- двояковыпуклые;
- выпуклые в одну сторону, но с разной кривизной – мениски.

Существуют линзы не только положительные, описанные выше, но и отрицательные:

- двояковогнутая;
- плосковогнутая;
- вогнутый мениск.

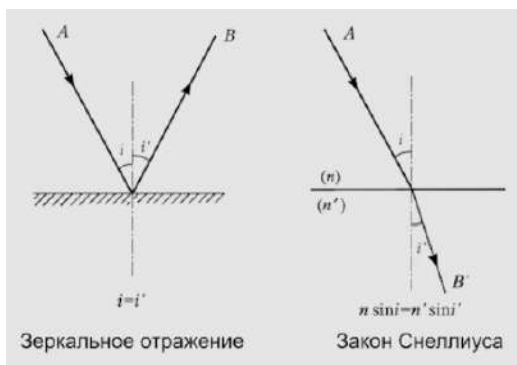


Рис. 3.4. Законы отражения и преломления светового луча

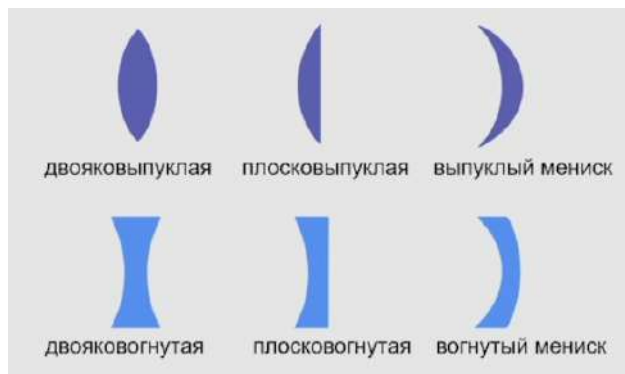


Рис. 3.5. Тонкие линзы

В школьных учебниках часто очень грубо описывают свойства линз. Так, на рисунке 3.6. показано типичное изображение линзы: параллельный пучок света (все лучи параллельны) падает на линзу, и она их фокусирует его в точку на экране – это место фокуса параллельного пучка.

На рисунке 3.7 показано более точное описание работы линзы. Существуют фокусирующие зеркала, они имеют сферическую или параболическую форму. В таких зеркалах лучи фокусируются не в одну точку.

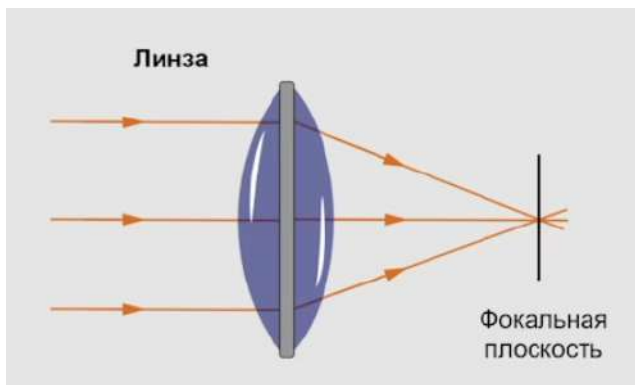


Рис. 3.6. Простая линза

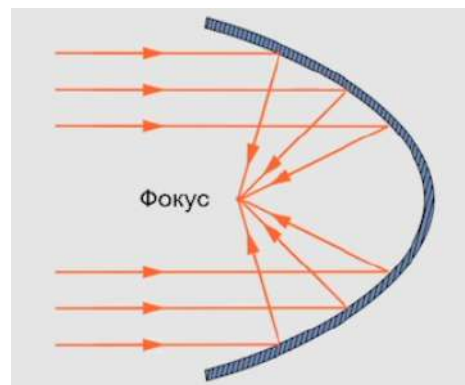


Рис. 3.7. Зеркальный параболоид

Расщепление света на составляющие цвета тоже можно сделать с помощью прозрачной среды (рис. 3.8): например, с помощью оптической призмы. Белый луч падает на оптическую призму так, что лучи света из нее выходят в различающихся направлениях. Одним из первых способность призмы разделять белый свет на цвета исследовал Исаак Ньютон. Он написал одну из первых книг по оптике.

На рисунке 3.9 показано стеклянное сечение – кварцевая призма: на нее падает белый луч. Белый свет – это смесь электромагнитных волн (лучей всех цветов) с разной длиной волны. Входя в тело призмы лучи начинают расщепляться на цвета, а выходя из нее расщепляются еще сильнее.



Рис. 3.8. Расщепление света Исааком Ньютоном

Цвет зависит от длины волны. Для каждой длины волны свойства прозрачного вещества различаются: различается коэффициент преломления. Свет синего цвета преломляется сильнее всех, а красного – слабее.

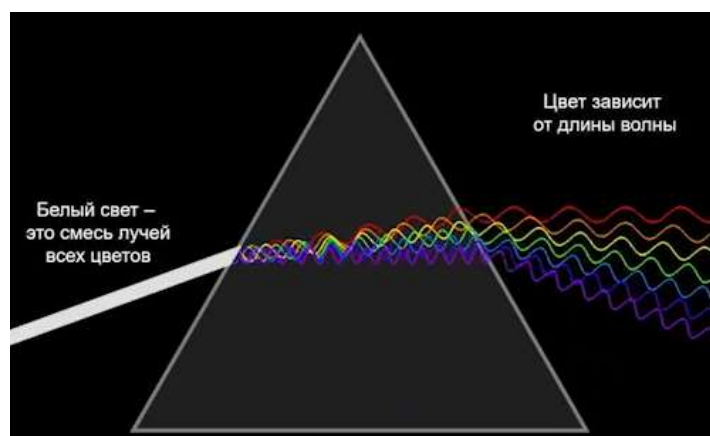


Рис. 3.9. Преломление и расщепление белого света

Глаз человека способен воспринимать световые лучи длиной волны от 400 нм до 700 нм – это весь диапазон человеческого зрения. Существует и более длинноволновое инфракрасное излучение и более коротковолновое ультрафиолетовое излучение, однако наше зрение не способно его различать.

Одна призма – это еще не прибор. Простейшая схема спектро스코па показана на рисунке 3.10. Во-первых, собранный телескопом свет необходимо пропустить через узкую входную щель, чтобы изображение щели легло на экран и каждый цвет получился в виде цветной полосы. Далее ставится оптический объектив (*коллиматор*),

который из расходящегося луча создает параллельный. Все параллельно падающие лучи попадают на грань призмы. Пройдя через призму, они остаются параллельными для каждого цвета (параллельно выходят красные, параллельно – синие). Далее лучи фокусируются через фотокамеру, которая собирает лучи каждого цвета в точку.

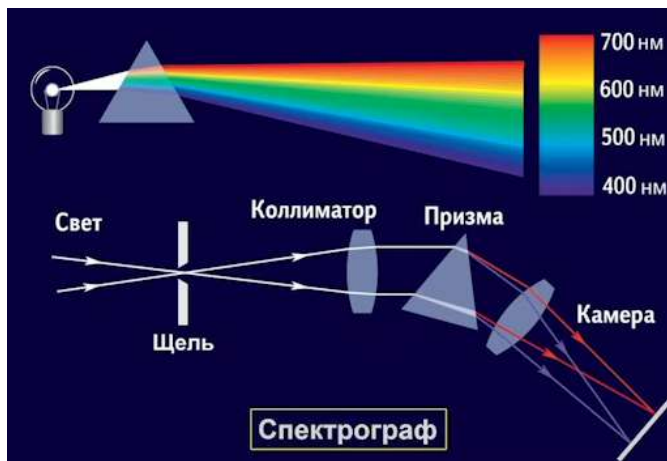


Рис. 3.10. Спектральный (цветовой) состав и анализ света

Типы спектров

Рассмотрим облако горячего газа и его спектр (рис. 3.11): газ, состоящий из одинаковых атомов. Переходы электронов из каждого атома излучают те или иные фотоны конкретной энергии (конкретной длины волны). В этом случае наблюдаются те цвета в спектре на черном фоне, которые характерны для излучения атомов конкретного газа. Такой спектр называется *спектр излучения горячего газа*.

Рассмотрим другой источник света, например твердое горячее тело. Раньше во многих домах использовались лампы со спиралью накаливания. Внутри металлической спирали электроны сталкиваются друг с другом и излучают всевозможные цвета: полный набор частот и длин волн спектра. В этом случае в спектре получается сплошная полоска. Таким образом, случайное хаотичное колебание электронов в горячем теле создает *непрерывный спектр*.

Рассмотрим источник непрерывного спектра – лампу. На пути ее луча поставим облако холодного газа – его атомы не возбуждены и не излучают. Когда рядом с этими атомами пролетают фотоны, которые эти атомы могут поглотить, они их поглощают. Таким образом, в спектре наблюдается недостаток тех цветов (темные линии на рисунке 3.11), которые были характерны для излучения горячего газа. Такой спектр называется *спектром поглощения*.

Таким образом, спектр хранит в себе информацию о том, из чего состоит вещество. Ведь спектр каждого химического элемента давно изучен в лабораториях. Именно таким образом астрономы узнают, какое вещество светится.

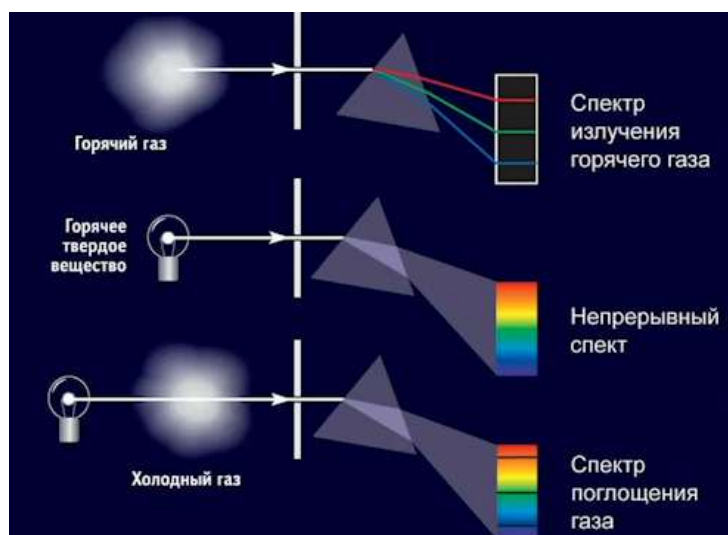


Рис. 3.11. Типы спектров

На рисунке 3.12 показаны спектры некоторых чистых химических элементов: водорода, натрия, гелия. Все спектры – разные, поэтому компьютер, в котором заложена база данных спектров элементарных химических элементов, может расшифровать любой сложный спектр, полученный астрономом от далекой звезды. Таким образом, будет получена информация о том, какие линии в спектре принадлежат какому химическому элементу. С помощью этой информации можно даже количественно рассортировать газы.

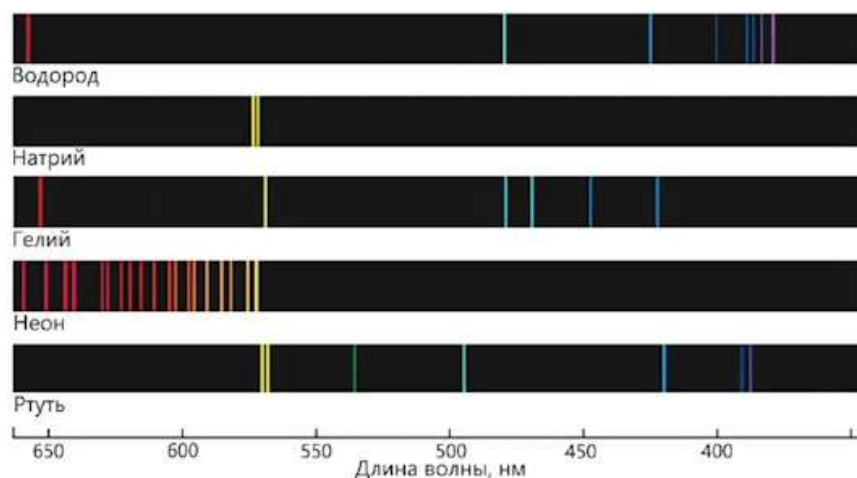


Рис. 3.12. Спектры химических элементов

Волновая оптика

Свет – это периодическое колебание электромагнитного поля. Длина волны содержит информацию о том, какого цвета излучение приходит. Этот факт можно использовать для создания анализатора спектров.

Физиками был придуман прибор – *дифракционная решетка* (рис. 3.13). Она работает так: существует источник света, коллиматор (объектив), который посылает

параллельный пучок света на дифракционную решетку – пластинка с прозрачными и непрозрачными линиями. Пучок света, проходя через тонкие линии, испытывает дифракцию, т.е. расходится в разных направлениях.

Идущие из всех щелей дифракционной решетки в одном направлении лучи объектив фокусирует в точку на экране. Стоит отметить, что лучи, прошедшие через разные отверстия, прошли разные расстояния. $\Delta\lambda$ – разность в путях света, который свет прошел из двух щелей. В конечную точку лучи пришли в разное время и со сдвигом волны. Если бы волны пришли синхронно, то наблюдалось бы увеличение яркости цвета. Если же вершина одной волны попала на минимум другой волны, то они друг друга компенсируют. Таким образом, в том месте, где волны накладываются друг на друга вершинами – конкретный цвет усиливается. На рисунке 3.13 показано, что из смеси цветов с помощью дифракционной решетки на экране получается спектр.

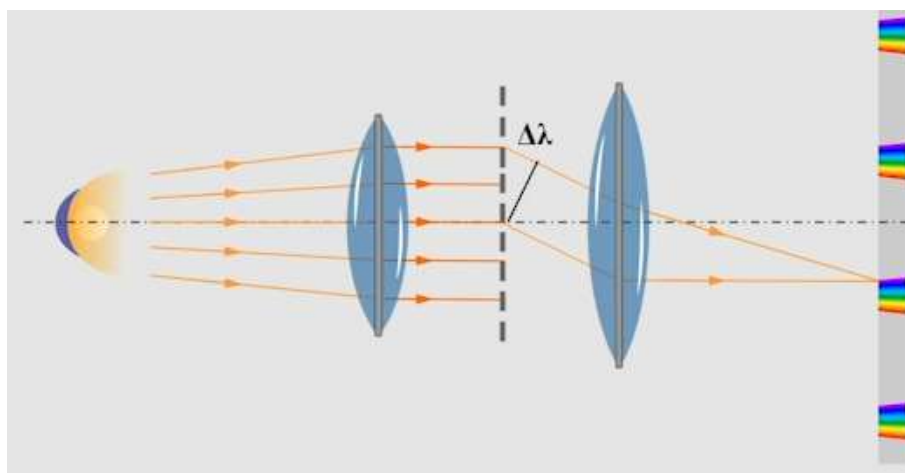


Рис. 3.13. Дифракционная решетка

Физики давно овладели этой техникой спектрального анализа, и он оказался более эффективным, чем использование прозрачных призм. В настоящее время почти все спектрографы в качестве диспергирующего элемента (т.е. разделяющего свет на отдельные цвета) используют дифракционную решетку.

3.2. Оптические объективы, их особенности и недостатки: сферическая и хроматическая аберрации, кома, кривизна поля, астигматизм

Рассмотрим, как выглядит устройство оптических телескопов.

Оптические аберрации

Очевидно, что линза (т.к. краевая часть линзы – это призма) разделяет свет на отдельные цвета: синий преломится сильнее, а красный – слабее всех лучей. Таким образом, в фокус синий соберется в одном месте, а красный – в другом, все промежуточные лучи соберутся между ними. Настоящего фокуса не будет. Это называется *хроматической аберрацией линзы*. От латинского *хрῶμα* «хромос» – цвет, «*абerrация*» – искажение.

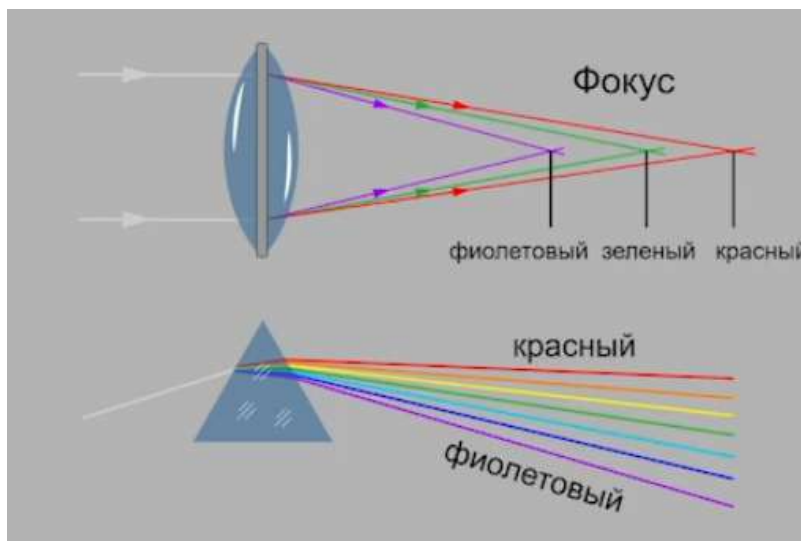


Рис. 3.14. Хроматическая aberrация простой линзы

Одна линза создает весьма некачественное изображение объекта (оно окрашено в разные цвета и не очень резкое). Для получения более четкого изображения необходимо использовать минимум две линзы из разных сортов стекла — *ахроматический дублет*. Их недостатки взаимно скомпенсируют друг друга и лучи разных цветов соберутся в одной точке фокуса (рис. 3.15). Рисунок Луны слева обладает меньшей хроматической aberrацией.



Рис. 3.15. Оптические aberrации

У линзы существует еще один недостаток: даже если пропустить через нее лучи одного цвета, они не соберутся в один фокус, так как края преломляют сильнее, чем центральная часть линз. Это характерно для линз, имеющих форму сферы. Такая aberrация называется *сферической*.

Существует два способа избежать сферической аберрации (рис. 3.17):

- 1) Закрывать края – поместить перед линзой диафрагму, которая пропускает маленькую долю световых лучей в центральную часть. Таким образом изображение станет четким, но бледным, так как прошло мало света.
- 2) Использовать две линзы (дуплет) – положительную и отрицательную. Недостатки линз будут компенсировать друг друга.

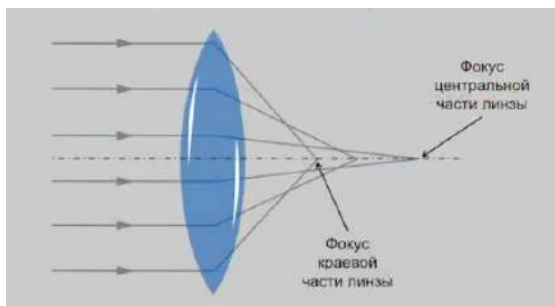


Рис. 3.16. Сферическая аберрация

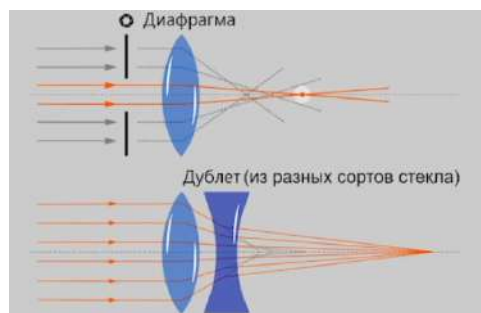


Рис. 3.17. Борьба со сферической аберрацией

Более эффективной борьбой с аберрацией является использование трех линз: можно скомпенсировать хроматизм и сферическую аберрацию, т.к. можно подбирать три свободных параметра.

Недостатки, присущие линзе, присутствуют и у зеркала. Однако хроматизма у зеркала нет – зеркало одинаково отражает лучи всех цветов. Сферическое зеркало обладает аберрацией, оно фокусирует все лучи, только выходящие из центра сферы. От сферической аберрации можно избавиться, сделав зеркало параболическим. Параболическое зеркало фокусирует лучи, приходящие вдоль оптической оси (параллельно падающие лучи), но лучи, приходящие из других направлений в одном фокусе, не соберутся.

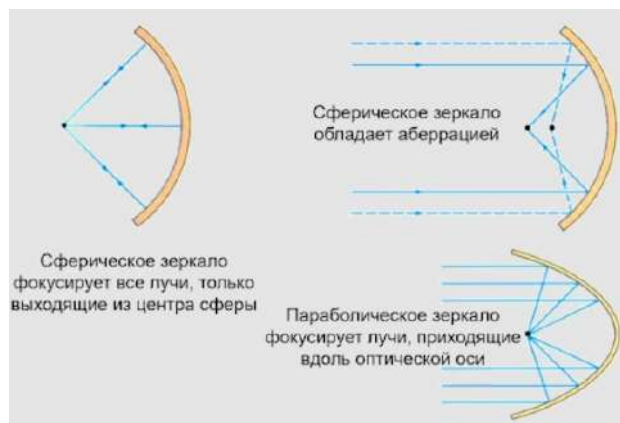


Рис. 3.18. Оптические аберрации

Внеосевые оптические аберрации

Существуют и другие аберрации: астигматизм (рис. 3.19).

Зрительный астигматизм связан с тем, что хрусталик глаза имеет разную кривизну в разных плоскостях. Астигматизм симметричных круглых объективов связан с тем, в одной плоскости объектив собирает в фокус лучи в одном месте, а в другой плоскости – в другом: нет такой точки, где все лучи, приходящие с одного направления, но в разных плоскостях, собрались бы в одну точку фокуса.

Еще одна разновидность оптической аберрации – *кома*, лучи, проходящие не параллельно оптической оси и пронизывающие линзу в разных местах собираются в разных точках. Общее изображение далекой звезды будет не точкой, а «*кляксой*». На латинском языке «*кома*» – это «*пучок волос*»; слово «*комета*» имеет такой же корень. Такое кометообразное изображение можно заметить на краю всех фотоаппаратов. Хорошие объективы борются с таким видом аберрации, но это не легко.



Рис. 3.19. Астигматизм

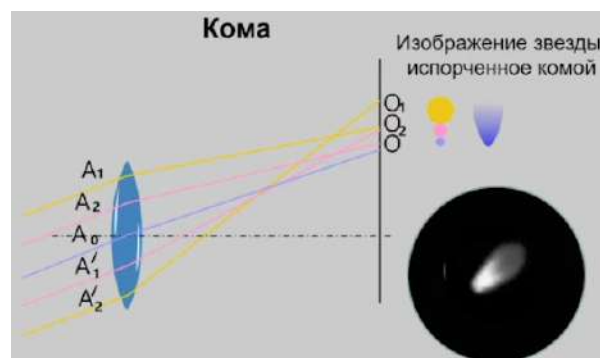


Рис. 3.20. Кома

Еще одним недостатком является *кривизна поля* (рис. 3.21). – место, где объектив создает наиболее четкое изображение – не фокальная плоскость, а сложная кривая.

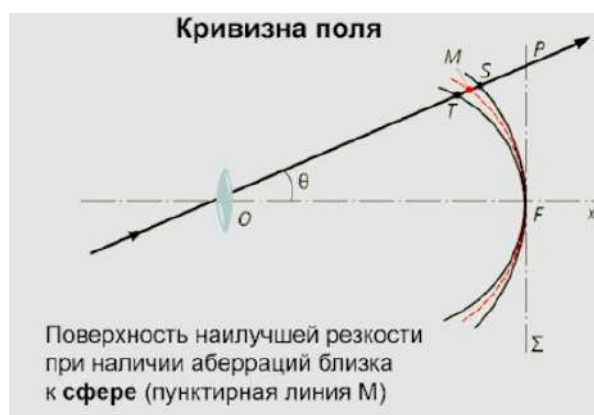


Рис. 3.21. Кривизна поля

Кривизна напоминает строение глаза. Сетчатка имеет фокальную поверхность в виде кривой (рис. 3.22).

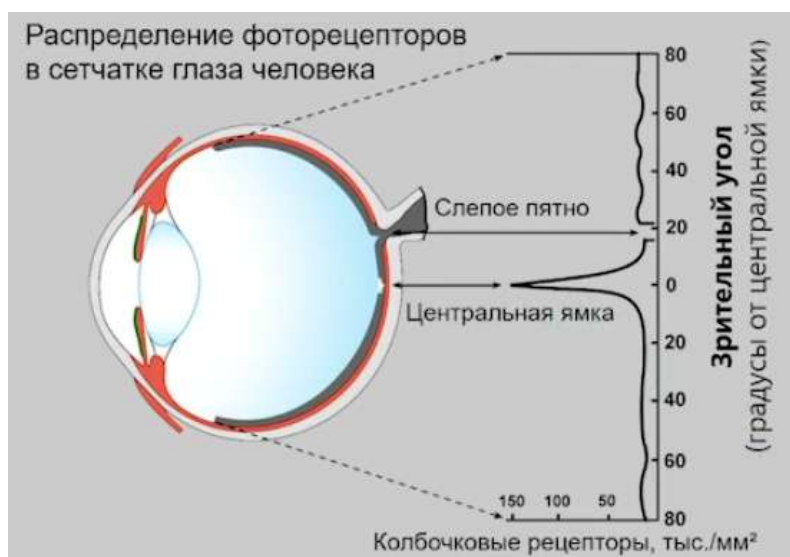


Рис. 3.22. Форма сетчатки глаза

Еще одной оптической аберрацией является *дисторсия*. На рисунке 3.23 показан пример: если не искажаемое изображение выглядит как сетка из прямых квадратов, тогда изображение, созданное объективом, будет искажаться либо как подушкообразная дисторсия, либо как бочкообразная дисторсия.



Рис. 3.23. Дисторсия

Дисторсия часто проявляется на фотографиях, сделанных через широкоугольный объектив (рис. 3.24). Очевидно, что стены плоские, а на фотографии они выглядят бочкообразными. Аналогичное искажение показано и на рисунке 3.25.

Из-за дисторсии астрономы почти никогда не используют широкоугольную оптику, так как с этой проблемой очень тяжело бороться: поле зрения телескопа всегда очень маленькое, однако четкое.



Рис. 3.24. Пример бочкообразной дисторсии: конференц-зал ГАИШ МГУ



Рис. 3.25. Бочкообразная дисторсия на фото с широкоугольным объективом «рыбий глаз»

В объективах фотоаппаратов, чтобы поле зрения было широкими: 60-120 градусов. Самые простые объективы фотоаппаратов содержат три линзы. Более дорогие объективы содержат 7-8 линз.

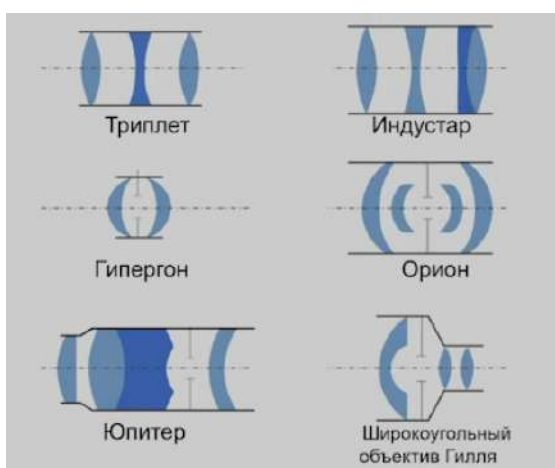


Рис. 3.26. Фотообъективы

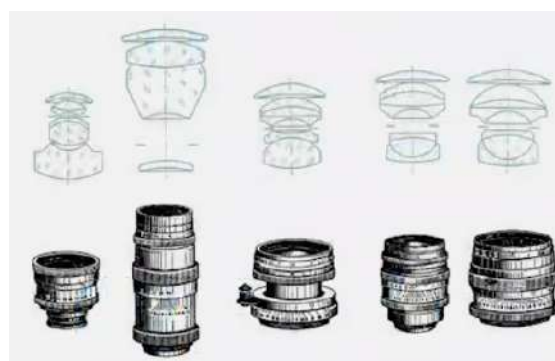


Рис. 3.27. Фотообъективы

В объективах микроскопов гораздо более сложная система линз: проходя через каждую линзу свет немного поглощается. В микроскопии это не такая большая проблема, так как можно подсветить объект, рассматриваемый в микроскоп. Поэтому микроскопы создаются с упором на качество изображения (рис. 3.28). Но при фотографировании природного объекта, особенно космического, терять свет жалко.

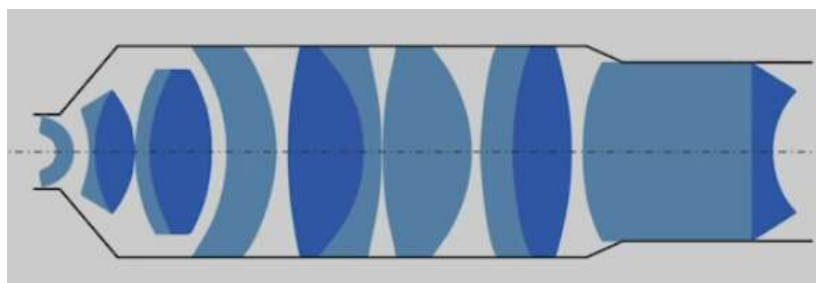


Рис. 3.28. Объектив микроскопа. Планоахромат

Урок 4. Телескопы и обсерватории

4.1. История и принцип работы телескопа. Рефракторы, рефлекторы, зеркально-линзовые системы

Принцип телескопа

Телескоп состоит из линзы, которые были придуманы давно. Еще древние греки пользовались кусочками случайно найденного хрусталя – полировали его и пользовались ими в качестве луп. Настоящее производство линз началось еще в конце 12 – начале 13 века. В 13 веке уже можно было купить очки (рис. 4.1). Телескопов в те времена еще не было.

Телескоп долго изобретали. Особенность телескопа в сравнении с лупой или очками заключается в следующем: попробуйте рассмотреть какой-либо объект в мелких деталях. Приближая к глазу мелкие детали, мы наблюдаем нечеткое изображение. Зрачок глаза не фокусирует изображение на сетчатке. Необходимо помочь зрачку – воспользоваться лупой, тогда изображение будет в фокусе.

Астрономы не могут подойти к объекту своего наблюдения. Прошло несколько столетий, пока люди не догадались, что можно использовать две линзы: одна линза создает изображение далекого объекта, а вторая линза, как лупа, позволяет его детально рассмотреть. В 16-17 веках телескоп был нужен не астрономам, а морякам, использовавшим подзорную трубу. В конце 16 века уже не только Магеллан переплывал Атлантику – много кораблей ходило в Индию, они встречались в море. В таких случаях, капитану корабля нужно было понимать, встретила ли его команда торговый корабль или пиратов. Подзорную трубу создали голландские мастера. Она имела простое строение: впереди линза с длинным фокусом (объектив), которая создает изображение, вторая линза – окуляр – помогает рассматривать изображение.



Рис. 4.1. Очки XIII века

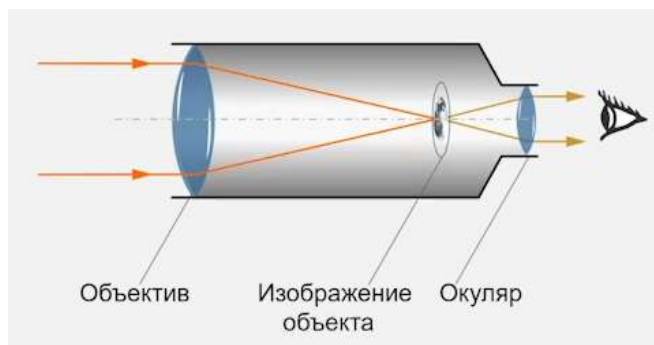


Рис. 4.2. Принцип телескопа

Для астрономии этого было мало. Тогда в 1609 году итальянский физик Галилео Галилей стал улучшать конструкцию подзорной трубы и быстро достиг увеличения в 25-30 раз. Самая лучшая его труба увеличивала объекты в 33 раза.

Во Флоренции существует музей Галилея. Там хранится объектив первого телескопа Галилея, оформленный в рамку из слоновой кости. В начале 1610 года

Галилео Галилей описал свои открытия и стал не только великим физиком, но и астрономом. К сожалению, этот объектив разбит на три части.

Улучшение увеличения и качества изображения в телескопе было возможно уже в те годы (начало 17 века). Телескопы были однолинзовые, так как сорт стекла, из которого делали линзы, был только один, поэтому увеличивали только фокусное состояние. В этом случае размер изображения становился больше, но главное: пропадали или сильно ослаблялись все аберрации. Телескопы становились очень длинными (рис. 4.6) – телескоп Яна Гевелия был длиной 45 м.



Рис. 4.3. Галилео Галилей



Рис. 4.4. Телескоп Галилея, 1609 год



Рис. 4.5. Объектив первого телескопа Галилея

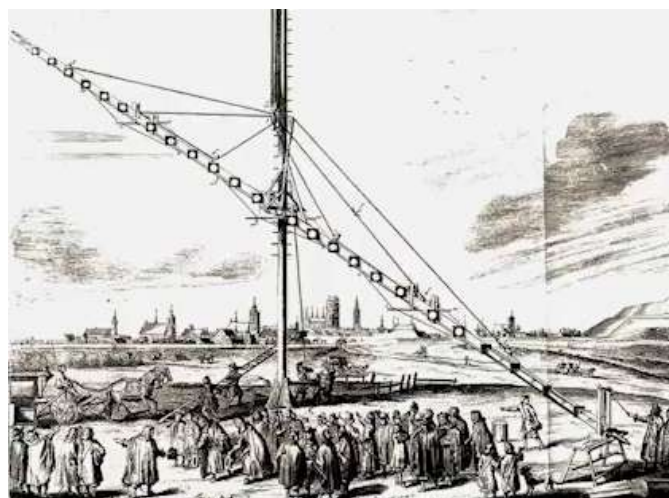


Рис. 4.6. Телескоп Яна Гевелия (Гданьск, Польша)

Крупнейшие телескопы-рефракторы

Астрономы используют двухлинзовые объективы, которые дают изображение со сравнительно небольшим фокусным расстоянием. Крупнейшие в мире телескопы-рефракторы имеют диаметр около 1 м. Таких телескопа 2 (оба в США): у одного

объектив диаметром 94 см находится в Калифорнии, у второго объектив около 103 см находится на Восточном побережии, недалеко от Чикаго (рис. 4.7-4.8).

Объективов больше диаметра на данный момент не существует, так очень трудно выплавить крупную однородную заготовку стекла для шлифовки линз объектива. Однажды это удалось сделать во Франции (1,5 м линза), но у такой линзы был недостаток: линза закрепляется по краям, поэтому, когда она имеет диаметр больше метра, вес ее становится таким большим, что центральная часть начинает провисать и линза деформируется.



Рис. 4.7. 36-дюймовый рефрактор Ликской обсерватории на горе Гамильтон в Калифорнии, 1888г.



Рис. 4.8. 36-дюймовый рефрактор Ликской обсерватории на горе Гамильтон в Калифорнии, 1888г.

В 1668 году Исаак Ньютон построил первый действующий телескоп-рефлектор, когда ему было чуть более 20 лет. За это изобретение его приняли в Королевскую Академию Наук. После он написал книгу «Оптика».



Рис. 4.9. Первый телескоп



Рис. 4.10. Копия телескопа Ньютона в масштабе 1:1

Телескоп Ньютона был небольших размеров. Телескопы отличаются лишь тем, что Ньютон использовал металлическое зеркало (стекло тогда не умели обрабатывать). Модель в руках у Владимира Георгиевича сделана с использованием стеклянного зеркала (рис. 4.10).

Со временем телескопы-рефлекторы стали улучшаться. Важный вклад внес немец Вильям Гершель, бывший музыкантом по образованию. В. Гершель доказал, что человек, не обладая финансовыми и технологическими возможностями, может у себя дома сделать своими руками качественный телескоп. Диаметр объектива телескопа был около 1 м.

Современные любители астрономии делают зеркальные объективы до 50 см.



Рис. 4.11. Вильям Гершель

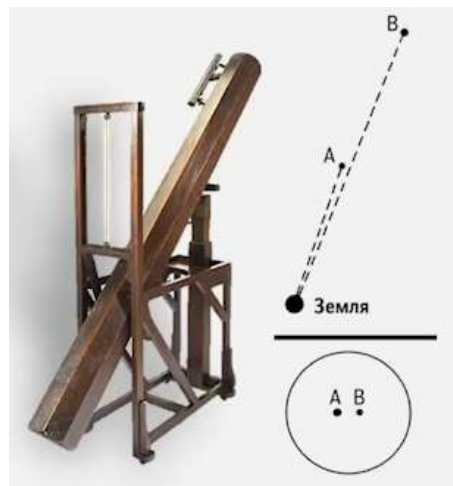


Рис. 4.12. Телескоп-рефлектор Гершеля

Типы телескопов

В настоящее время существует три типа телескопов:

- рефрактор;
- рефлектор;
- катадиоптрический (зеркально-линзовый).

В рефракторе объективом служит сочетание линз. В рефлекторе объективом служит зеркало. В любительских телескопах оно имеет сферическую форму, в профессиональных телескопах зеркало параболической или даже гиперболической формы. Катадиоптрический телескоп, изобретенный в середине 20 века, имеет совмещенную конструкцию: зеркало расположено в задней части трубы, линза не сферическая. Зеркало должно быть обязательно сферическое. Для того, чтобы погасить сферические aberrации перед зеркалом ставят сложной формы пластинку (мениск) Шмидта. В особенностях сферического зеркала выделяют отсутствие оптической оси (имеет одинаковую кривизну). Поэтому у таких телескопов большое поле зрения.

Все три конструкции доступны и профессиональным астрономам, и любителям. На рисунке 4.15 показан крупнейший современный телескоп-рефлектор БТА (большой

телескоп альт-азимутальный) диаметром 6 м обсерватории САО РАН. *Альт-азимутальный* телескоп поворачивается по азимуту и по высоте (альт). Телескоп был построен около 50 лет назад.

На рисунке 4.16 показан телескоп квалифицированного астронома-любителя. Телескоп оснащен электроникой, главной и вторичной трубой, искатель для наведения на объект исследования, электронную камеру с охлаждением.

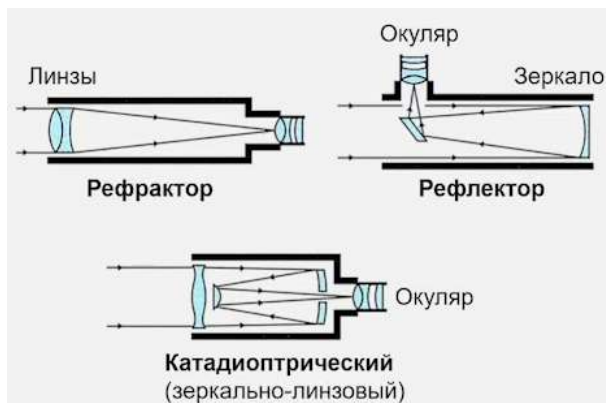


Рис. 4.13. Типы телескопов



Рис. 4.14. Типы телескопов



Рис. 4.15. Современный телескоп-рефлектор



Рис. 4.16. Телескоп квалифицированного астронома-любителя

4.2. Обсерватории мира

Обсерватории – всегда оригинальные сооружения. Их строительство производится в зависимости от: месторасположением, потребностями, финансовыми возможностями.

На рисунке 4.17 показана обсерватория конца XIX века. В ней находятся помещения лаборатории (кабинеты, хранилища, залы для научных заседаний и др.) и башня телескопа, накрытая куполом. В куполе есть щель, которая раскрывается и через которую астрономы смотрят в телескоп. Купол может поворачиваться и можно изучать любой участок неба.



Рис. 4.17. Обсерватория Washington College, Topeka, Kansas

На рисунке 4.18 показана Кавказская горная обсерватория Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Она находится в предгорьях Эльбруса. В Европейской части России лучших мест для астрономических наблюдений нет. Обсерватория включает башню большого телескопа (диаметром 2,5 м), несколько небольших башен, подземные помещения для исследований, мастерские, лаборатории, столовые, гостиницы и конференц-залы. Сегодня это самая современная астрономическая обсерватория в вашей стране.



Рис. 4.18. Кавказская горная обсерватория Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

На рисунке 4.19 показана знаменитая «Башня Эйнштейна». В начале 20 века был создан солнечный телескоп, имеющий особую конструкцию. Длиннофокусную трубу очень неудобно поворачивать, поэтому телескоп вертикальный и стоит неподвижный. Наверху стоит система из двух зеркал, которая хватается луч Солнца, поворачивает его и направляет в неподвижную трубу.

На рисунке 4.20 показан большой телескоп МГУ. Диаметр объектива – большой, а длина телескопа – маленькая. Большой телескоп МГУ – это короткофокусный инструмент, поэтому башня для него сравнительно небольшая. Телескоп имеет альт-азимутальную установку. Научное оборудование устанавливается на специальных площадках. Конструкция телескопа называется *системой Кассегрена*, т.е. главное зеркало отражает свет на небольшое вторичное, которое отражает обратно в отверстие главного зеркала и луч проходит в фокус.



Рис. 4.19. Солнечный телескоп
«Башня Эйнштейна», Потсдам, ФРГ

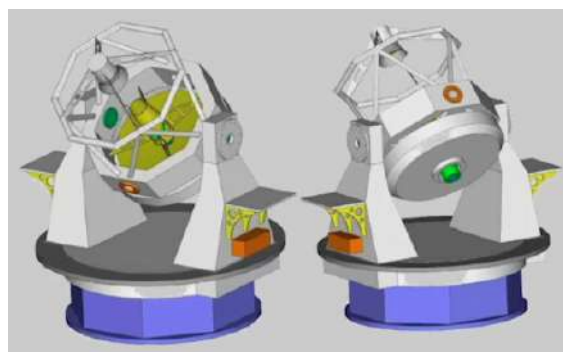


Рис. 4.20. Телескоп-рефлектор диаметром
2,5 м. Кавказской горной обсерватории
ГАИШ МГУ

Оптические телескопы находятся в закрытых помещениях – башнях. Назначение башни очень важное – закрыть от непогоды (ветра/дождя/снега), смягчить колебания почвы. Большинство телескопов используются в горах, где часто бывают землетрясения. Поэтому башня должна демпфировать колебания почвы и не передавать их на конструкцию телескопа.

На рисунке 4.21 показана башня 8 м телескопа, находящегося на южно-европейской обсерватории в Чили. Недавно там было землетрясение почти в 8 баллов. От такого землетрясения рушатся здания, однако башня компенсировала эти колебания, и конструкция телескопа не была нарушена.

Еще одно важное назначение башни – сохранять под куполом микроклимат (температуру и влажность воздуха). Перепады температур в горах может изменить конструкцию телескопа. Тепловые напряжения зеркала могут привести к тому, что зеркало потеряет свою форму и не будет давать четкого изображения. Чтобы этого не произошло, необходимо днем поддерживать прогнозируемую температуру на ближайшую ночь.



Рис. 4.21. Телескоп и его башня

Городские и пригородные обсерватории

В прошлом обсерватории строили недалеко от столичных городов. Их посещали и государственные чиновники, и публика, именно поэтому им пытались придать красивый и современный для той эпохи вид. На рисунке 4.22 показана очень красивая обсерватория в Париже (Франция). Под куполом находит большой рефрактор.



Рис. 4.22. Обсерватория в Мёдоне, Париж, Франция

Обсерватории в горах

Астрономы работают в дали от городов, их обычно никто не посещают. Все башни оптимизированы для научной работы, и красоте, в отличие от городских обсерваторий, им никто не придает.

На рисунке 4.23 показана обсерватория в горах Франции, вершина Пик-дю-Миди высотой около 3 км, труднодоступное место. Это лучшая из обсерваторий 19 века и одна из лучших обсерваторий 20 века. Сегодня обсерватория Пи-дю-Миди уступает свое первенство обсерватории Эгюий-дю-Миди.



Рис. 4.23. Обсерватория Пик-дю-Миди, Франция



Рис. 4.24. Обсерватория Эгюий-дю-Миди, высота 3843 м, Шамони, Монблан

Обсерватории в горных пустынях

Современные обсерватории выглядят как одна из крупнейших обсерваторий мира: Европейская южная обсерватория, Серро Параналь в Андах, Чили. Обсерватория состоит из четырех башен с гигантскими телескопами с диаметром объективом 8,2 м. Они находятся рядом друг с другом и могут работать совместно и одновременно исследовать одни и те же объекты. Преимуществом такого месторасположения обсерватории является сухость воздуха. На севере Чили, вдоль Чилийского побережья протекает холодное океанское течение, поэтому нет сильных испарений – воздух сухой. На фотографии видно, что рядом ничего не растет из-за того, что воздух сухой, там трудно жить, а значит нет ночного освещения деревень и городов. С другой стороны, воздух, лишенный паров атмосферы, очень прозрачный, причем не только в оптике, но и в ближнем инфракрасном диапазоне.

Обсерватории на островах

Астрономы, изучающие Солнце, работают днем (рис. 4.26) и Солнце сильно нагревает помещения.



Рис. 4.25. Европейская южная обсерватория, Серро Параналь в Андах



Рис. 4.26. Солнечная обсерватория на озере Big Bear (Калифорния)

Солнечные обсерватории окрашивают в белый цвет специальной краской, которая отражает оптику и инфракрасный солнечный свет. Если телескоп стоит на земле, то земная поверхность нагревается днем, а ночью с нее поднимается теплый воздух и смешивается с холодным. Турбулентные потоки воздуха создают колебания изображения. Такая идея впервые была реализована на озере Big Bear в Калифорнии. Там был насыпан искусственный полуостров, на который поставили посередине озера башню Солнечного телескопа.

Астрономы, изучающие ночное небо, тоже решили устанавливать телескопы в окружении холодной воды – в океане. Так на островах стали сооружать обсерватории (рис. 4.27). На рисунке показаны Канарские острова. Самый астрономический из них – это остров Пальма, где обсерваторию построили прямо на вершине древнего вулкана на высоте 2.5 км.

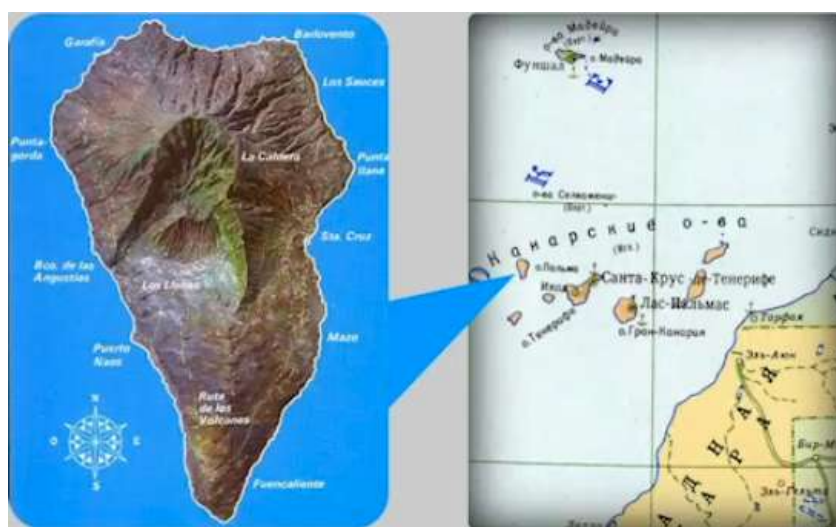


Рис. 4.27. Остров Пальма (La Palma)

На рисунке 4.28 видно, что облака находятся ниже уровня обсерватории, потому что вокруг находится холодная атлантическая вода и нет восходящих потоков воздуха. В таких местах телескопы работают очень эффективно. Еще более эффективное место для телескопа – это гора Мауна-Кеа на острове Гавайи (рис. 4.29). Здесь находятся самые крупные телескопы, которые сегодня функционируют у астрономов.

Летающая обсерватория

Еще более высокого расположения обсерватории можно добиться, если поместить ее на самолет. Телескоп в самолете поднимается на высоту около 12 км, открывается окно и телескоп работает в оптике и в инфракрасном диапазоне.

Выше находятся стратосферные обсерватории, под ним подвешен летающий телескоп. Они одноразовые, и их, как правило, запускают с побережья Антарктиды. Дело в том, что взлетев с побережья Антарктиды, баллон попадает в циркумполярный ветер – циркумполярное движение нашей атмосферы и его проносит вокруг южного

полюса, он возвращается в точку старта. Далее по команде с Земли рвется нить, и телескоп на парашюте опускается на Землю.



Рис. 4.28. Обсерватория на Канарских островах



Рис. 4.29. Обсерватория на горе Мауна-Кеа, о. Гавайи, 4130



Рис. 4.30. SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, США/ФРГ)



Рис. 4.31. Стратосферная обсерватория

Самой дорогой для ученых обсерваторией является космическая обсерватория. Далеко не каждая страна может приобрести такое оборудование.

Космический телескоп «Хаббл» был запущен в космос в 1990 году.



Рис. 4.32. Космический телескоп «Хаббл»

Урок 5. Приёмники излучения. Влияние атмосферы и анализ излучения

Телескопы создают изображения далекого космического объекта, но это изображение нужно не только увидеть, а еще и сфотографировать, запомнить для дальнейшего анализа. Эту роль исполняют специальные приборы – приемники излучения.

5.1. Приемники излучения: глаз, фотопластинка, фотоэлемент, ФЭУ, ЭОП, ПЗС

Глаз

Первым приемником фотонов/оптических лучей в телескопе был глаз человека. С 1609 года, когда был изобретен телескоп, и до середины 19 века астрономы смотрели в телескоп глазом.

У глаза есть свои особенности и свойства. Роль объектива (части, которая создает изображения) играет и передняя поверхность глаза, и жидкость внутри нее, но основной элемент, который динамически работает – это *хрусталик*. Хрусталик интересен тем, что он может сжиматься и расширяться, меняя кривизну своей поверхности. При поднесении объекта наблюдения к глазу хрусталику приходится с помощью мышц глазного яблока искривлять поверхность все сильнее и сильнее, чтобы лучи преломились и сфокусировались на задней поверхности глаза на сетчатке.

Аккомодация глаза (от лат. *accomodatio* – приспособление) – наведение на резкость путём перемещения хрусталика (у рыб, земноводных и пресмыкающихся) или путём изменения кривизны хрусталика (у млекопитающих).

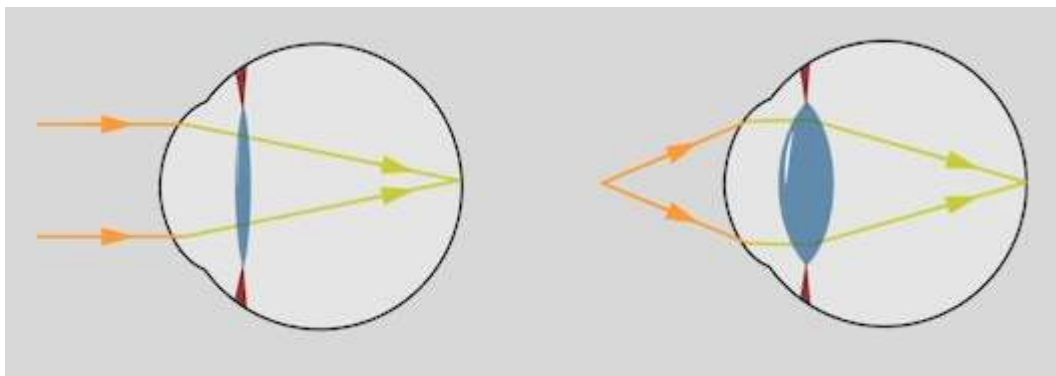


Рис. 5.1. Аккомодация глаза

Сетчатка глаза – это поверхность, которая воспринимает свет. Сетчатка сложно устроена и имеет сотни миллионов отдельных клеток, воспринимающих свет – колбочки и палочки. Колбочки бывают трех типов: красные, зеленые, синие; палочки воспринимают свет любого цвета, но они более чувствительных к слабым потокам света. Это помогает человеку видеть и днем, и ночью.

Строение глаза показано на рисунке 5.2. Глаз – это крайней сложный инструмент, который не просто передает «пиксель за пикселем» в наш мозг. Глаз проводит

предварительную обработку изображения, чтобы упростить его и снизить нагрузку на мозг.

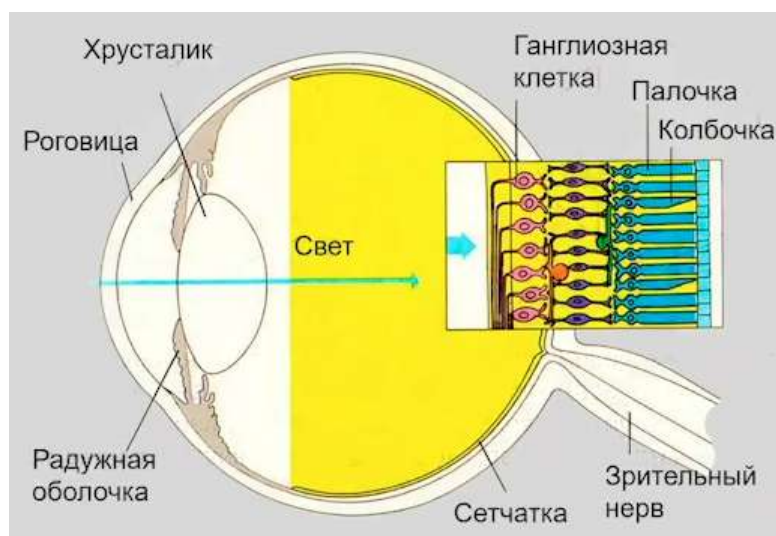


Рис. 5.2. Строение глаза

Сетчатка – сложная биологическая структура, которая принимает и обрабатывает изображение и позже передает информацию в мозг.

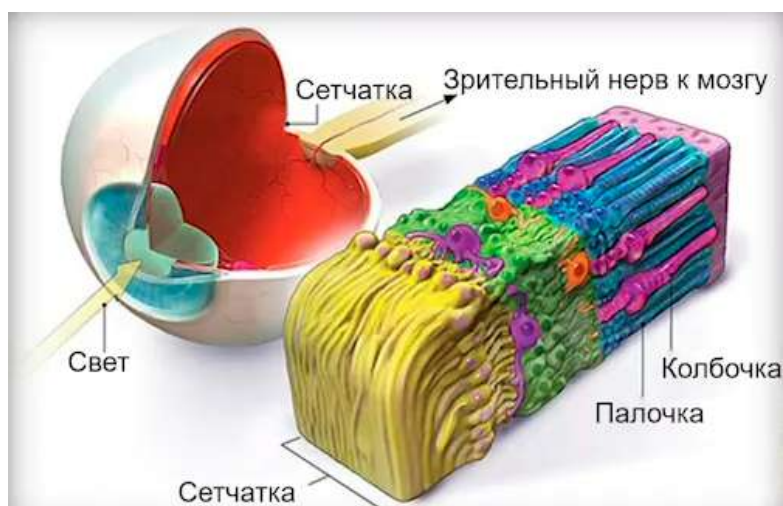


Рис. 5.3. Строение глаза

Долгое время у человека не было других инструментов, кроме как глаза, чтобы сохранять и обрабатывать информацию, полученную с использованием телескопа. В то же время, телескопы совершенствовались.

На рисунке 5.4 показана туманность Ориона – как ее воспринимал глаз человека. Картинка показана в негативе, т.е. более яркие части на рисунке показаны более темным цветом. Сравним рисунок, сделанный человеком (рис. 5.4) и фотографию Туманности Ориона, сделанную современным электронным приемником, можно найти как сходства, так и различия. Глазом были выделены не все элементы, а некоторые элементы были придуманы.

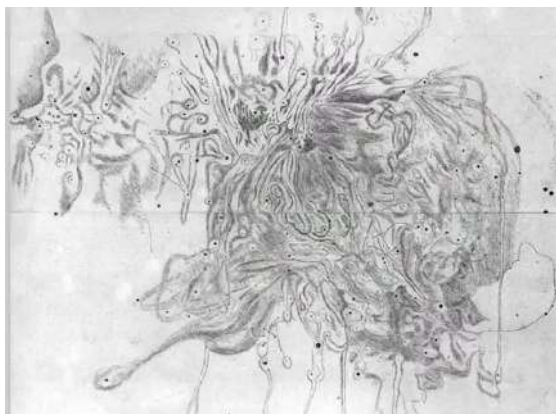


Рис. 5.4. Туманность Ориона. Рисунок человека



Рис. 5.5. Туманность Ориона. Фотография

Самым известным примером являются каналы на Марсе: в середине 19 века ученые начали детально зарисовывать карту мелких тонких линий на Марсе (каналов). В эпоху космонавтики сделали несколько фотографий Марса, на которых видно, что на самом деле никаких каналов нет. Поэтому глаз не самый эффективный приемник света.

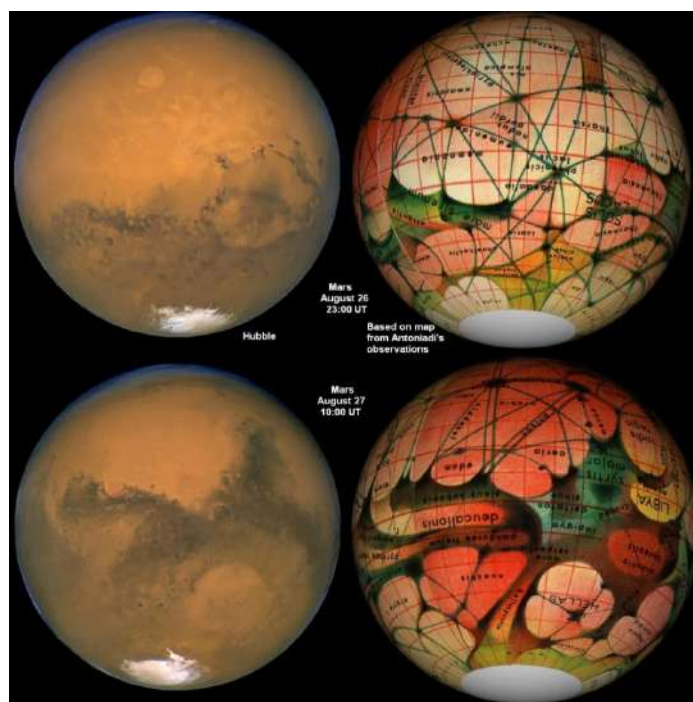


Рис. 5.6. Фотографии Марса (Хаббл») – слева, рисунок Марса человеком в 19 веке – справа

Фотография

В середине 19 века была изобретена фотография. Фотографии делали через объектив, откуда свет поступал на приемник света – фотопластинку. Химический способ фиксации изображений совершенствовался весь XIX век.

Стеклянная фотопластинка (рис. 5.8) – это плоский кусочек стекла, на который налит слой желатина и который застывает и становится почти твердым. В желатин замешано химическое вещество: $ArBr$, $ArCl$. Такие кристаллы вещества при попадании на них света чернеют под химическими реактивами. Таким образом, на фотопластинке получается изображение того кусочка неба, которое снимают.

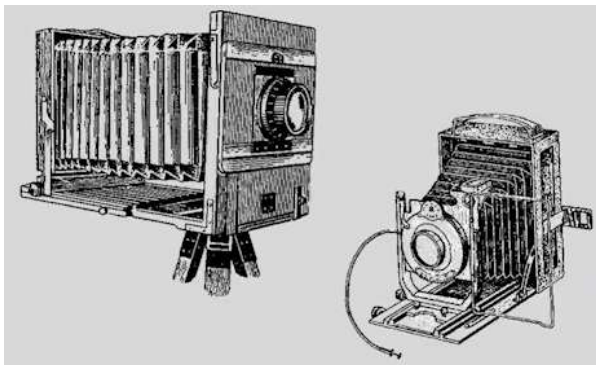


Рис. 5.7. Объективы 19 века

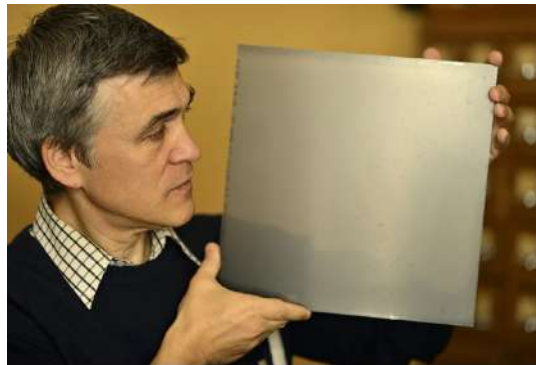


Рис. 5.8. Стеклянная фотопластинка

На рисунке 5.9 показан астроном середины XX века. Кассеты плотно закрывали, чтобы дневной свет их не испортил. Кассеты с фотопластинкой вешали на телескоп, вытягивали затвор, фотопластинке становился виден объектив, который создавал изображение.



Рис. 5.9. Астроном середины XX века



Рис. 5.10. Телескоп

Далее в специальном микроскопе смотрели на одну или две фотопластинки (рис. 5.11). Микроскоп имел два объектива и один окуляр, поэтому используя специальную ручку можно было менять фотопластинки. Если в одну из ночей появлялся другой объект, то таким способом можно было обнаружить мигание объекта на фотопластинках. Астроном, изучающий фотопластинку в микроскоп – это Клайд Томбо, который открыл Плутон в 1930 году. На рисунке 5.12 показано изображение

неба на фотопластинках (позитив) – это та самая пара пластинок, которые исследовал Томбо. Стрелками показано положение Плутона.



Рис. 5.11. Астроном изучает фотопластинку в микроскоп



Рис. 5.12. Фотопластинки с изображением Плутона, 1930 г.

Фотопластинки служили долго, но их способности небезграничны: они довольно плохо воспринимают свет. Если на фотопластинку упало, например, 100 фотонов, то из них 5 фотонов оставят свой след. В начале 20 века появились электронные приемники света, и астрономы стали использовать их сначала в качестве дополнения, а потом полностью заменили ими фотопластинки. Самый элементарный – это фотоэлемент – колба, из которой откачен воздух, катод и анод (рис. 5.13), к ним присоединены полюса батареи (к катоду – минус, к аноду – плюс). Колба прозрачная – свет входит через нее, падает на поверхность фотокатода и его энергии хватает, чтобы выбить электроны из поверхности фотокатода (металлической поверхности). Электрон выскакивает из пластинки: отталкивается от катода, летит к аноду и поглощается на нем, т.е. цепь замыкается и начинает течь электрический ток. Чем ярче свет падает на фотокатод, тем сильнее ток. Его регистрируют и измеряют гальванометром и таким образом узнают какой яркости/мощности свет падает на фотокатод.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

Для того, чтобы прибор заметил ток, необходимо, чтобы тысячи электронов каждую секунду пролетали сквозь промежуток (т.е. необходим яркий свет). Хочется заметить каждый элементарный фотон. Это оказалось возможно с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) (рис. 5.14).

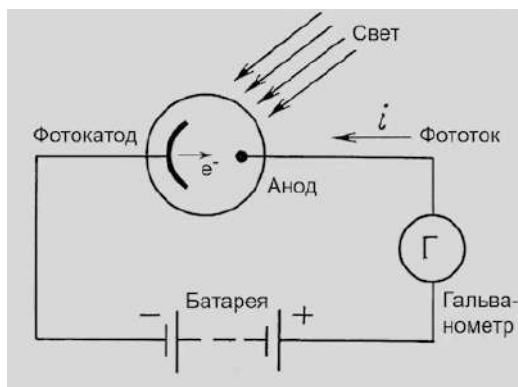


Рис. 5.13. Фотозэлемент с внешним эффектом



Рис. 5.14. Фотозлектронный умножитель (ФЭУ)

Фотозлектронные умножители состоят из колбы, из которой откачан воздух, и прозрачного окна, сквозь которое падает свет, собранный телескопом на первый динод (фотокатод), и выбивает один электрон – внешний фотоэффект; на контакты подается разное напряжение (разность напряжений около 100В), тогда электрон летит к более положительному диноду и приобретает энергию 100 эВ (электронвольт), ударяет и выбивает 2-4 дополнительных электрона, каждый из которых выбивает по такой же схеме еще электроны. К последнему аноду приходит не один электрон, а около миллиона. По сути, фотозлектронные умножители состоят из нескольких фотозэлементов. Коэффициент вторичной электронной эмиссии около 4. При 10 каскадах коэффициент умножения равен $4^{10} = 10^6$.



Рис. 5.15. Фотозлектронный умножитель

На фотографии 5.16 показано строение фотозлектронного умножителя: умножительная система состоит из серии вторичных катодов (динодов).



Рис. 5.16. Умножительная система ФЭУ

- 29

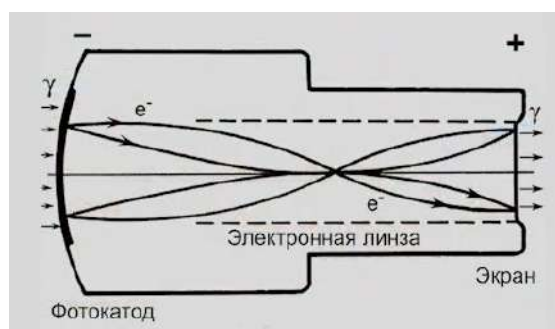


Рис. 5.17. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП)

Электронно-оптический преобразователь (ЭОП)

В отличие от ФЭУ, которая позволяет понять, какое количество света (фотонов) поступило, *электронно-оптический преобразователь* (рис. 5.17) получает изображение и увеличивает его яркость. ЭОП переводит оптическое излучение в электронное, затем из потока электронов в оптическое излучение.

Электронно-оптический преобразователь состоит из колбы, из которой откачен воздух. На поверхность фотокатода снаружи падает поток света, собранный телескопом. Из каждой части, куда попадает яркий фотон, вылетает электрон и летит через электрические катушки, создающие магнитное поле, в экран: куда бы электрон не вылетел (в каком бы направлении), магнитная линза сфокусирует его – т.е. каждая яркая точка на фотокатоде передает взаимно-однозначное соответствие между изображением, собранным телескопом, и изображением, которое переносят электроны. Такая система похожа на систему в экранах старых телевизоров. Такие приборы (в качестве приборов ночного видения) часто используются военными, охотниками, которые работают ночью.

Прибор с зарядовой связью (ПЗС)

В настоящее время самыми популярными приемниками света являются *ПЗС (прибор с зарядовой связью)* матрицы. Прибор состоит из большого количества элементарных ячеек (пикселей). В бытовых камерах/камерах сотовых телефонах перед матрицей пикселей ставят набор светофильтров (фильтр Байера). Астрономы не ставят таких фильтров и получают черно-белое изображение. Если же необходимо получить цветное изображение, тогда поверхность закрывают сначала синим, потом красным и зеленым фильтром – получаются три картинки, которые складываются вместе и получается цветное изображение.

ПЗС матрица устроена следующим образом: после падения фотоны попадают в полупроводниковое тело матрицы, где вызывают появление свободных электронов – фотоэффект, но не внешний, а внутренний (электрон становится свободным и отщепляется от кристаллической решетки, но электрический потенциал его

удерживает). Волна электрического потенциала передает накопленные электроны к краю ПЗС-матрицы.

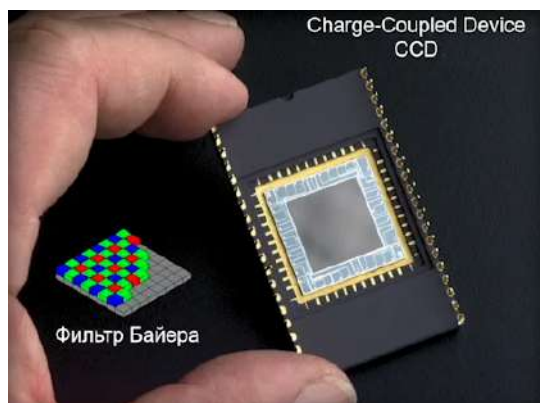


Рис. 5.18. Прибор с зарядовой связью ПЗС

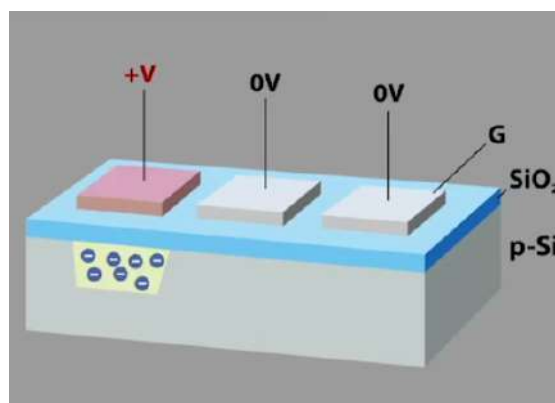


Рис. 5.19. Прибор с зарядовой связью

В последнее время ПЗС матрицы стали делать не плоские, а вогнутые. Изогнутые ПЗС-матрицы улучшают качество фотокатода. Они теряют меньше света по краям (виньетирование) и меньше подвержены aberrациям (кривизна поля).

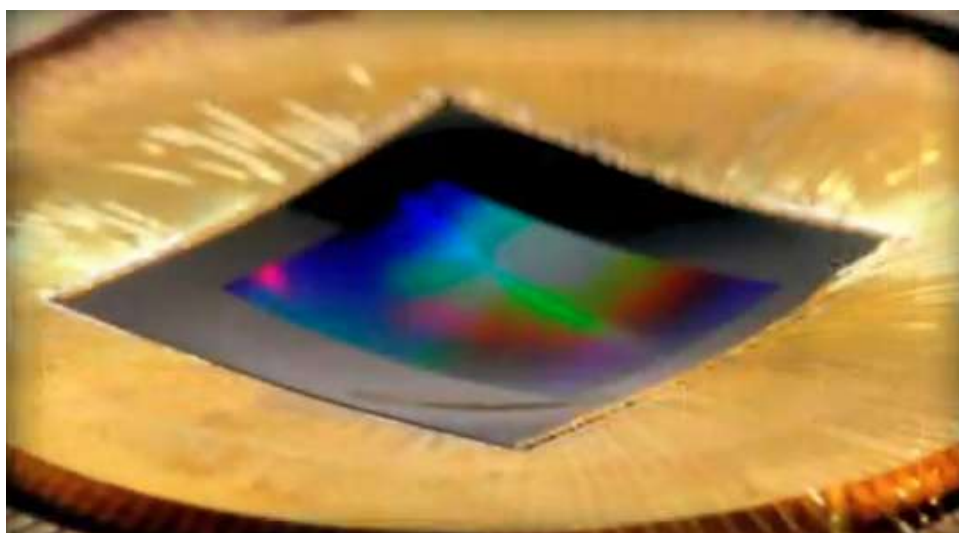


Рис. 5.20. Прибор с зарядовой связью (ПЗС)

В бытовых камерах есть оба вида ПЗС матриц.

На рисунке 5.21 показана фотокамера большого телескопа – сооружение весом более 1 т. Внутрь ее закачивается холодная жидкость (жидкий азот), которая охлаждает эту матрицу до той степени, чтобы там не рождалось случайных свободных электронов из-за тепловых колебаний кристаллической решетки приемника света. Электроны должны появляться только от фотонов света, приходящих из космоса. В этом случае получается идеальное изображение.



Рис. 5.21. Фотокамера 8-метрового телескопа VTL

Фотокамера большого телескопа позволяет получать фотоснимки, которые не сделать на обычную камеру (рис. 5.22, 5.23).



*Рис. 5.22. Спиральная галактика
Туманность Андромеды (M31)*



*Рис. 5.23. Область формирования звезд
S106*

5.2. Влияние земной атмосферы на оптические наблюдения. Астроклимат.

Активная и адаптивная оптика

Астрономам при изучении космических объектов сильно мешает атмосфера. Над каждым телескопом находятся километры «бурлящего» воздуха. Иногда атмосфера настолько сильно забита облаками/смогом/твердыми частицами, что астрономы не могут работать совсем. Если астрономы говорят: «небо есть» – это значит, что небо чистое и они могут начинать свою работу; если «неба нет» – это значит, что небо закрыто облаками (рис. 5.24).

При перепадах температуры и наклонах телескопа его конструкция деформируется. Поэтому их накрывают башнями и куполами (рис. 5.25).



Рис. 5.24. Облачное небо



Рис. 5.25. Внутренняя конструкция телескопа

Особенно сильны перепады температуры происходят в горах при смене дня и ночи. На рисунке 5.26 показан 6-метровый телескоп на Кавказе. Купол его весит около 1000 тонн – самая большая башня телескопа в мире.



Рис. 5.26. Башня телескопа

Активная оптика

Для преодоления тепловых деформаций и гравитации используется система активной оптики: постоянно измеряя форму зеркала, компьютер создает управляющие сигналы, которые передают напряжение на нижнюю часть зеркала (так как свет отражается только от верхней части зеркала, а нижняя не задействована). Таким образом, система активной оптики поддерживает все элементы телескопа в стабильном состоянии. Работа по восстановлению формы зеркала ведется примерно каждые 10 с.

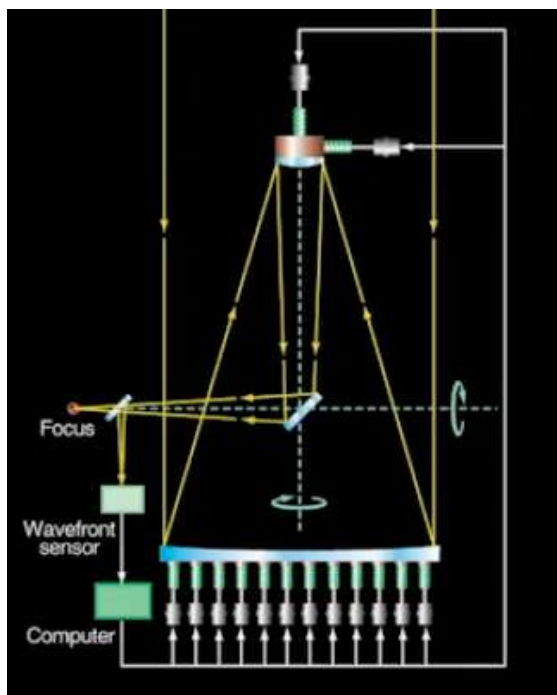


Рис. 5.27. Система активной оптики

Кроме того, вторичное зеркало, которое отражает свет дальше на светоприемную аппаратуру, нуждается в небольших коррекциях. Эта коррекция также выполняется системой активной оптики.

Многие крупные телескопы имеют сегментированные (т. е. составные) зеркальные объективы.

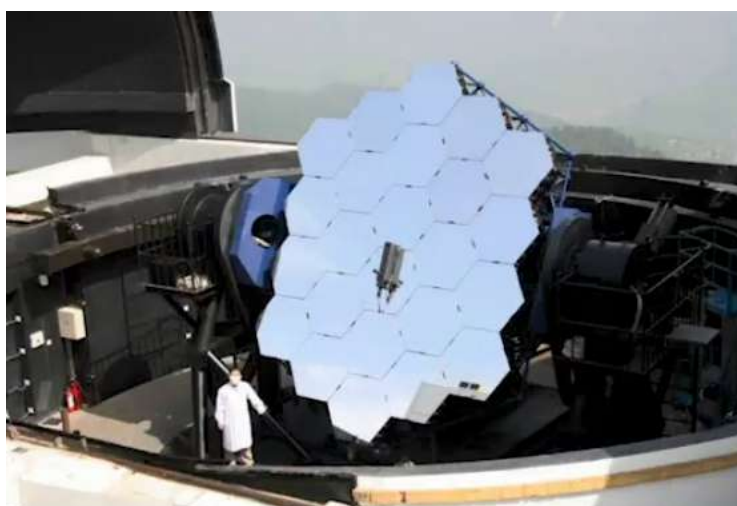


Рис. 5.28. Зеркальные объективы

Положением и наклоном каждого зеркала управляет система активной оптики (рис. 5.29, 5.30, 5.31). Таким образом, зеркала сохраняют идеальную оптическую форму.



Рис. 5.29. Сегментированные зеркальные объективы



Рис. 5.30. Система активной оптики



Рис. 5.31. Система активной оптики

Атмосфера Земли

Атмосфера не только меняет температуру телескопа, но и искажает изображение, получаемое телескопами. Фотография Земли из космоса на рисунке 5.32 сделана в оптическом диапазоне: атмосфера не совсем прозрачная – в некоторых местах закрывает части континентов. На рисунке 5.33 показана фотография Земли в инфракрасном диапазоне: атмосфера Земли становится почти непрозрачной – контуры материков тяжело прослеживаются.



Рис. 5.32. Фотография Земли из космоса в оптическом диапазоне

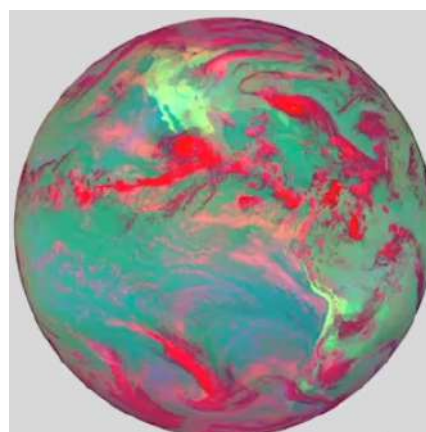


Рис. 5.33. Фотография Земли в инфракрасном диапазоне

На рисунке 5.34 показана фотография Земли в дальнем инфракрасном диапазоне излучения: лучи совершенно не проходят сквозь атмосферу Земли, поверхность Земли из космоса не видна.

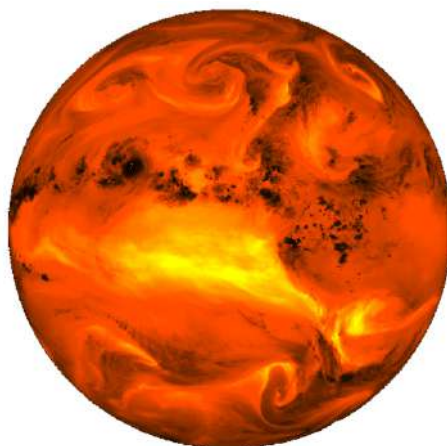


Рис. 5.34. Фотография Земли из космоса в дальнем инфракрасном диапазоне излучения

Атмосферное искажение изображений

Рассмотрим, как атмосфера портит изображение космических объектов. Луна на рисунке 5.35 – четкая, на рисунке 5.36 – тоже четко видно, значит можно поставить увеличение больше. При большем увеличении картинка начинает терять резкость – это влияние атмосферы.



Рис. 5.35. Луна. Вид при взгляде в бинокль/небольшой телескоп



Рис. 5.36. Луна при взгляде в средней телескоп (в увеличении)



Рис. 5.37. Луна. Вид при большом увеличении



Рис. 5.38. Потеря резкости изображения Луны

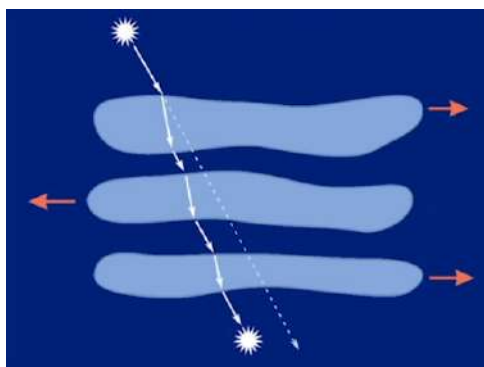


Рис. 5.39. Схема прохождения света сквозь атмосферу

Воздух в атмосфере постоянно движется (рис. 5.39), слои воздуха имеют разную температуру и подобно линзам преломляют идущий свет. В этом случае неподвижное в космосе положение звезды становится движущимся перед объективом телескопа. Если рассматривается протяженный объект (рис. 5.40), то лучи идут по разным траекториям и детали изображения начинают двигаться друг относительно друга.

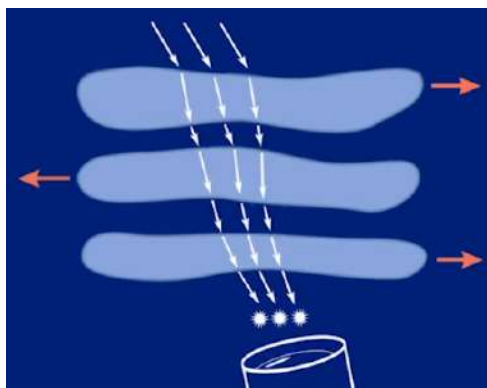


Рис. 5.40. Схема прохождения света сквозь атмосферу

На рисунках 5.40-5.41 показано атмосферное размытие изображений: замедленное воспроизведение киносъёмки изображения звезды при большом увеличении.



Рис. 5.41. Замедленное воспроизведение киносъёмки изображения звезды при большом увеличении



Рис. 5.42. Замедленное воспроизведение киносъёмки изображения звезды при большом увеличении

Адаптивная оптика

Для решения этой проблемы изобрели систему подавления атмосферных помех – *адаптивная оптика*. Благодаря этому телескоп собирает свет, отправляет его на мягкое зеркало, управляемое компьютером. Свет отразился от зеркала и пришел на полупрозрачную пластинку, которая половину света отправила на прибор, например, на фотокамеру, а половину на анализатор изображения. Анализатор выяснил, как именно исказилось изображение проходя через изображение и, с помощью компьютера, сформировал такой сигнал, который выгнул мягкое зеркало так, чтобы картинка стала идеальной.

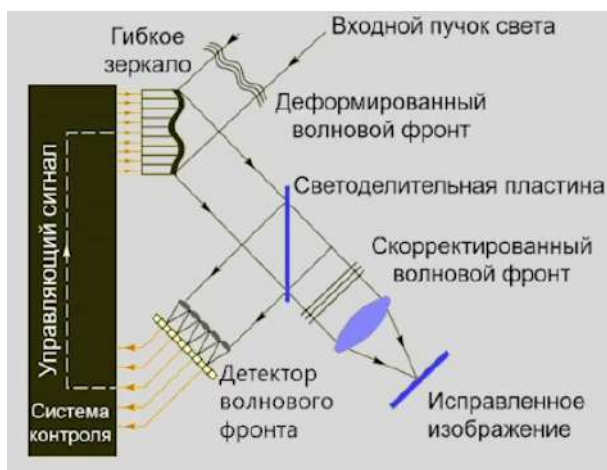


Рис. 5.43. Система подавления атмосферных помех

На рисунке 5.43 показано изображение двойной звезды до и после включения системы адаптивной оптики.

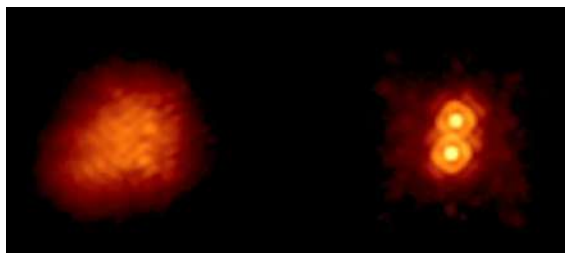


Рис. 5.43. Изображение двойной звезды до и после включения системы адаптивной оптики

Аналогичная картина показана на рисунке 5.44: изображение планет без использования системы адаптивной оптики и с использованием: размытое изображение становится четким и появляются детали.

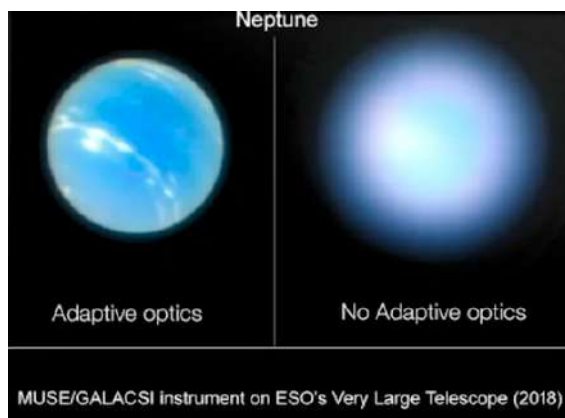


Рис. 5.44. Изображение планеты Нептун до и после включения системы адаптивной оптики

Иногда наземный телескоп с системой адаптивной оптики работает лучше. Чем космический телескоп (рис. 5.45).

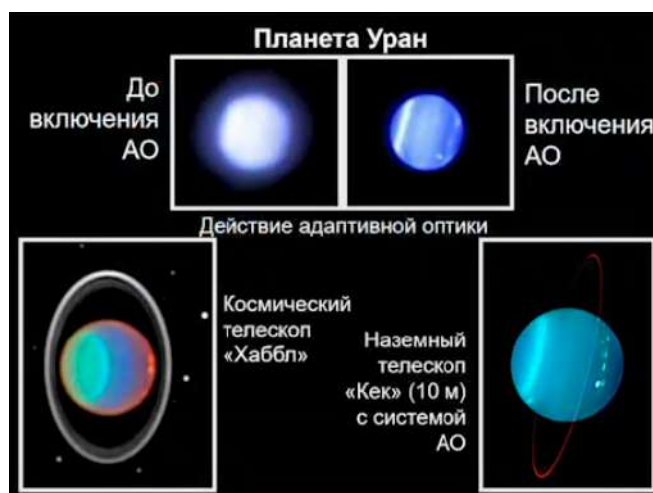


Рис. 5.45. Изображение планеты Уран до и после включения системы адаптивной оптики

На рисунке 5.46 показано изображение планеты Юпитер до и после включения системы адаптивной оптики. Адаптивная оптика позволяет сфотографировать Юпитер с помощью наземного телескопа в такой же детальности, как снимок с космического телескопа.

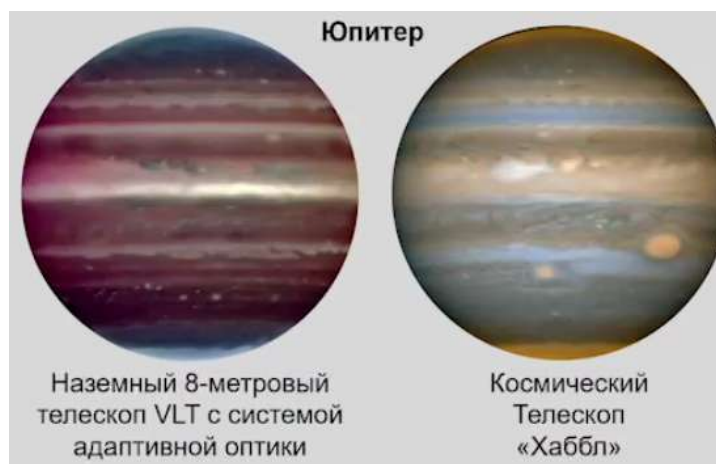


Рис. 5.46. Изображение планеты Юпитер до и после включения системы адаптивной оптики

Изучение поверхности Солнца также производится с использованием адаптивной оптики.

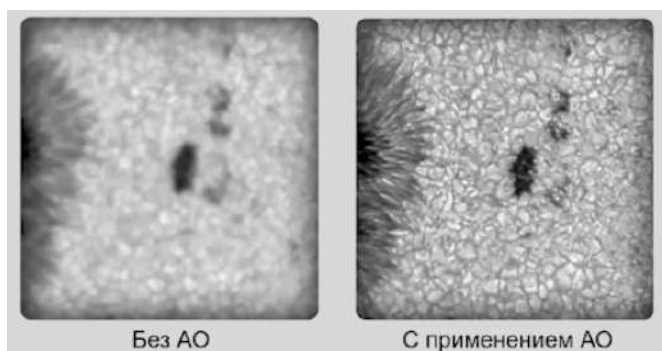


Рис. 5.47. Изображение Солнца до и после включения системы адаптивной оптики.
Национальная солнечная обсерватория Сакраменто-Пик, США

Урок 6. Радиоастрономия и телескопы в космосе

Кроме оптических телескопов, существуют и другие телескопы, например, радиотелескопы.

6.1. Радиоастрономия

Радиоастрономия появилась первой после оптической астрономии. В начале 20 века радиотехника получила свое развитие, которое еще активнее продолжилось в годы Великой Отечественной войны.

Рассмотрим рисунок 6.2: на схеме по горизонтальной линии отложена длина волны электромагнитного излучения – от самых коротковолновых (рентгеновского/ультрафиолетового излучения) до видимого света, ближнего и дальнего инфракрасного диапазона до широкого радиодиапазона. Далеко не каждый тип электромагнитного излучения проходит сквозь атмосферу Земли. Благодаря узкому оптическому окну, человек может наблюдать Солнце и космос своими глазами. Правее и левее (в диапазонах более коротких/длинных волн) наши глаза не воспринимают свет. Красная линия на схеме показывает высоту, на которой практически застревает приходящее из космоса излучение: на больших высотах застревает и ультрафиолет, и рентгеновское излучение; только самые мощные гамма-фотоны пробивают иногда атмосферу. Таким образом, коротковолновое излучение не проходит сквозь атмосферу Земли. Ближнее инфракрасное излучение иногда проходит сквозь атмосферу, иногда – нет. Длинноволновое инфракрасное излучение практически не проходит сквозь атмосферу. Именно поэтому, чтобы изучать космос в этом диапазоне излучения, необходимо запускать телескопы на орбиту. Радиоизлучение проходит сквозь атмосферу: от 1 мм до 10-20 м длиной.

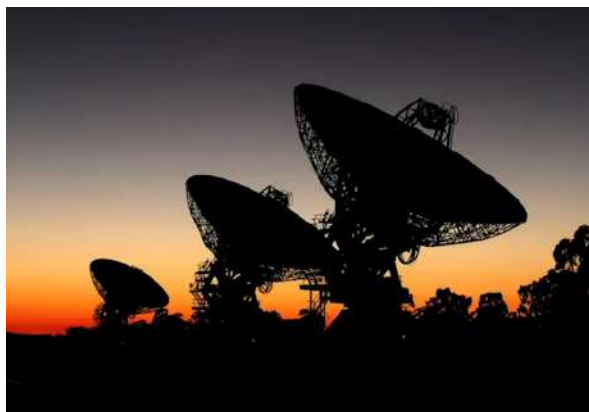


Рис. 6.1. Радиоастрономия

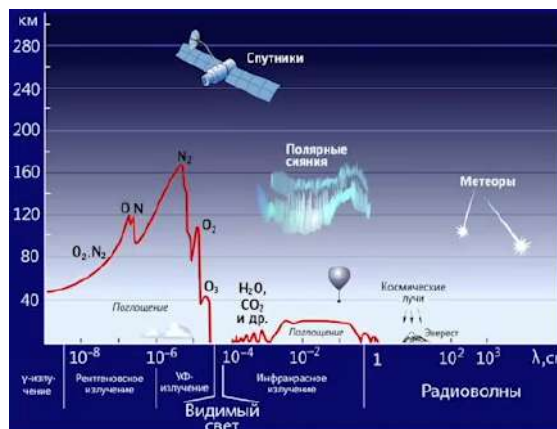


Рис. 6.2. Свойства земной атмосферы

Перед Второй Мировой войной, в середине 1930-х годов, первые радиотехники поняли, что из космоса приходит радиосигнал, а после Второй Мировой войны начали активно конструировать специальные приборы – радиотелескопы.

Радиотелескоп устроен достаточно просто: большая фокусирующая поверхность (обычно металлическая), которая фокусирует приходящие радио-лучи на вторичном

зеркале. Иногда вместо вторичного зеркала может стоять приемник. Вторичное зеркало фокусирует пучок света и отправляет его обратно, далее сигнал проходит по кабелям аппаратуры, его регистрируют, оцифровывают и записывают.



Рис. 6.3. Строение радиотелескопа

Радиотелескопы имеют гораздо больший размер в сравнении с оптическими. Их диаметр достигает десятков и даже сотен метров. Именно поэтому радиотелескопы весят сотни тонн. Поверхность радиотелескопа представляет собой гигантский парус: при воздействии сильного воздушного потока, конструкция радиотелескопа может быть деформирована. Самые крупные радиотелескопы имеют антенны около 100 м.



Рис. 6.4. Радиотелескоп. Антенна диаметром 70 м. Голдстоун (США)



Рис. 6.5. Радиотелескоп. Антенна диаметром 64 м Калязинской радиоастрономической обсерватории

Очень крупные антенны невозможно создать полноповоротными, иначе будет слишком массивная конструкция (рис. 6.6). Многие годы, антенна радиотелескопа в Аресибо была крупнейшей в мире. Над антенной была подвешена радиоприемная аппаратура. В силу того, что радиоприемная антенна могла немного менять свое расположение, то и луч зрения этой антенны, мог отклоняться от зенита, что позволяло изучать разные области на небесной сфере. Помимо приемной антенны, телескоп имеет и радиопередатчик – радар, который может отправить мощный радиосигнал в космос. Этот сигнал, отразившись от планеты, вернется обратно и будет принят. Таким образом, радар просвечивал поверхность далеких планет, таких как Марс и Венера.

К сожалению, несколько месяцев назад (начало 2021 года) телескоп был разрушен: один из канатов лопнул, и многотонная конструкция приемной антенны рухнула на зеркало. Человеческих жертв не было.

В настоящее время на месте разрушенного радиотелескопа планируют сделать более современный.



Рис. 6.6. Радиотелескоп в Аресибо, о. Пуэрто-Рико. Диаметр главного рефлектора 305 м

За некоторое время до разрушения антенны в Аресибо, В Китае был построен 500-метровый радиотелескоп (рис. 6.7). Имея большую площадь, радиотелескоп может принимать и усиливать более слабые радиосигналы. Этот радиотелескоп только начинает свою работу, так как любой крупный научный инструмент выходит на режим полноценной работы не сразу после строительства: людям необходимо научиться с ним работать, узнать об особенностях.



Рис. 6.6. Радиотелескоп в Китае. Диаметр главного рефлектора 500 м

На рисунке 6.7 показаны сравнительные размеры радиотелескопов в Аресибо и в Китае.

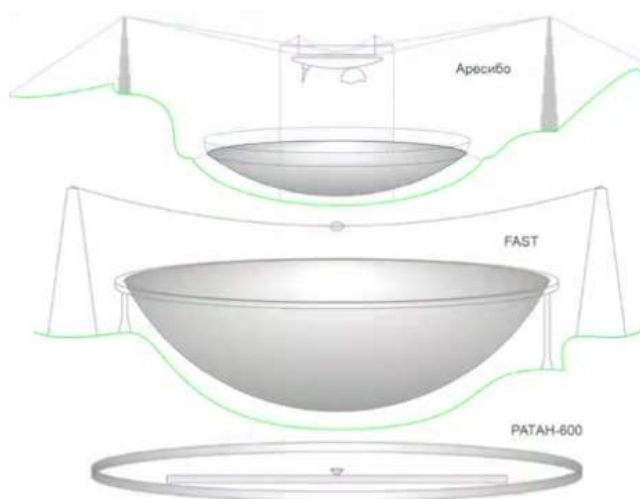


Рис. 6.7. Сравнительные размеры радиотелескопов в Китае

Более крупная антенна (радиотелескоп РАТАН-600), диаметром 600 м находится в России – на Северном Кавказе. Своей поверхностью (рис. 6.8) телескоп напоминает вырезанную из края антенны ленту. Внутри телескопа находятся дополнительные зеркала и радиоприемная аппаратура в специальных вагонах. РАТАН-600 работает в нашей стране начиная с 1970-х годов. В настоящее время этот радиотелескоп начинают активно модернизировать.

Радиоантенны бывают разного размера. На рисунке 6.9 показана большая сканирующая антенна ФИАН (г. Пущино-на-Оке). По своей сути, антенна состоит из

большого количества элементарных антенн. Так как площадь большая, то все сигналы, приходящие на антенны складываются и, таким образом, усиливаются.



Рис. 6.8. Радиотелескоп РАТАН-600



Рис. 6.9. Большая сканирующая антенна ФИАН (г. Пущино-на-Оке)

Антенна, показанная на рисунке 6.10, также находится в Пущино-на-Оке. Радиотелескоп является фокусирующим и имеет оригинальную конструкцию. Антенна имеет параболическую конструкцию, вытянутую в длину в 1 км. Радиотелескоп хорошо фокусирует в одном направлении, и чтобы это скомпенсировать, посередине телескопа на земле лежит такой же телескоп, вытянутый в перпендикулярном направлении. Таким образом, радиотелескопы похожи на крест: один цилиндр в одной плоскости, второй цилиндр – в другой. На пересечении радиоантенн телескоп получает наиболее четкое изображение. Таким образом, антенна – меридианного типа с незаполненной апертурой.

На рисунке 6.11 показана система из нескольких радиотелескопов, соединенных друг с другом и получающих совместное изображение небесного объекта. Каждый из телескопов можно переместить на большое расстояние, и тогда зеркало станет больше и четкость изображения увеличится, т.к. чем больше диаметр объектива, тем меньше влияет волновая природа электромагнитного излучения.



Рис. 6.10. Диапазонный крестообразный радиотелескоп 1000 м



Рис. 6.11. Радиointерферометр VLA

На рисунке 6.12 показана радиогалактика *Лебедь А*, полученная таким радиоинтерферометром: в центре наблюдается точка – это центр далекой галактики, там же находится гигантская черная дыра, вокруг которой бурлит газ и выбрасывает две мощных газовых струи, которые летят в диаметрально противоположных направлениях и накачивают плазмой огромные области космоса.

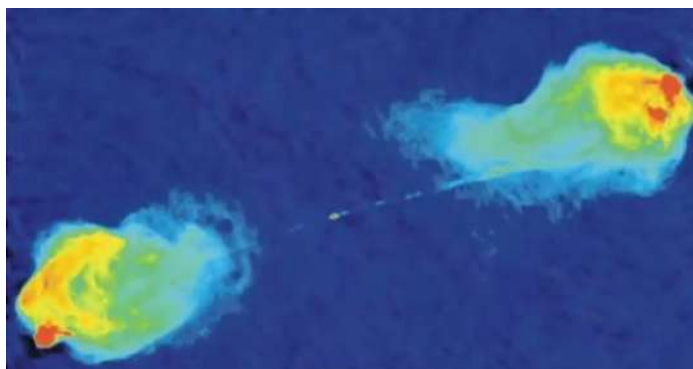


Рис. 6.12. Радиогалактика *Лебедь А* (VLA, 6 см)

Аббревиатура VLA расшифровывается как *Very Large Array* (рус. «очень большая антенная решётка»).

Астрономия миллиметрового диапазона

Аналогичные инструменты создаются и для изучения более коротковолнового излучения – субмиллиметровая область радиоастрономии.

Довольно долго астрономы шли к этому изобретению – необходимо было создать приемники такого излучения и найти место на Земле, где лучи проходят к поверхности Земли. Такое место обнаружилось высоко в горах (более 5 км) в Чили, в пустыне Атакама, где в настоящее время находится система из более 60 радиоантенн и объединяет собранный ими поток излучения. Такие системы физики называют *интерферометрами*, так как лучи складываются и взаимно либо поглощают, либо усиливают друг друга, т.е. интерферируют.



Рис. 6.13. ALMA – *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*. Обсерватория миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в высокогорной пустыне Атакама (Чили)

На рисунках 6.14 и 6.15 показано, что даже одна антенна миллиметрового диапазона способна на многое. Фотоснимок (рис. 6.14) – это оптический снимок темной туманности непрозрачной для оптического излучения. На фотоснимке виден горячий газ, молодые звезды, темные прожилки – это холодные газовые облака, сквозь которые ничего не видно. На это оптическое изображение наложено изображение в мм-диапазоне (рис. 6.15). В мм-диапазоне излучения, как правило, излучают молекулы.



Рис. 6.14. Оптический снимок темной туманности непрозрачной для оптического излучения



Рис. 6.15. Оптический снимок темной туманности с наложенным изображением в мм-диапазоне. Наблюдение одной антенной

В настоящее время *ALMA* (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) – самый продуктивный радиоастрономический инструмент. На фотоснимке (рис. 6.16) показана молодая звезда, окруженная протопланетным газо-пылевым диском: из разреженного вещества, которое нагрето этой звездой и светится в тепловых инфракрасных лучах, формируются новые планеты. Темные коридоры внутри облака говорят о том, что в

этих местах сформировалось крупное тело, которое поглотило пылинки и прочистило путь вдоль своей орбиты.



Рис. 6.16. Протопланетный диск вокруг звезды HL Тельца. Угловое разрешение 0.035. ALMA

Радиоастрономы стараются сделать радиоинтерферометрические системы все более крупными, чтобы получить наиболее четкую картину. Самая крупная на земном шаре радиоинтерферометрическая система показана на рисунке 6.17. Создать ее было нелегко: радиотелескопы миллиметрового диапазона, стоящие на разных континентах, удалось виртуально соединить друг с другом, что они стали одним большим инструментом.

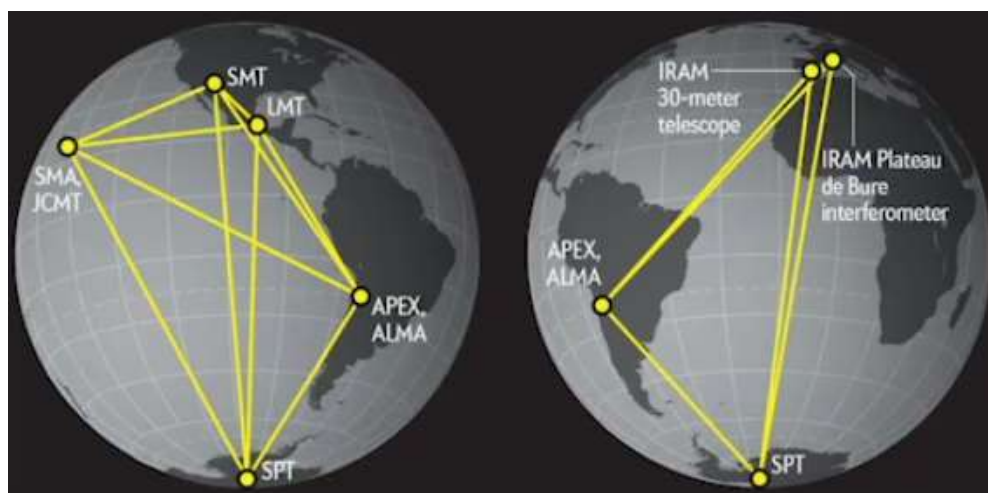


Рис. 6.17. Глобальная сеть радиотелескопов миллиметрового диапазона
EHT – Event Horizon Telescope «Телескоп горизонта событий»

Несколько лет назад с помощью этой радиосистемы было получено радиоизображение окрестностей (аккреционного диска) гигантской черной дыры, массой в миллиард масс Солнца, в одной из соседней галактик (рис. 6.18). На фотоснимке видна форма, распределение яркости и темное пятно в середине, что говорит о том, что посередине находится черная дыра, которая поглощает свет, изменяет направление световых лучей.

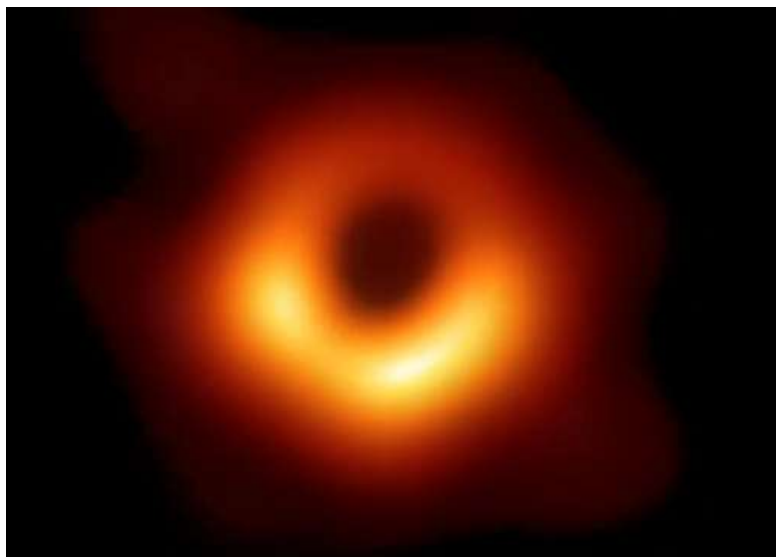


Рис. 6.18. Тень гигантской черной дыры в центре галактики M87

Изображение на рисунке 6.18 точно совпадает с изображением теоретических расчетов (рис. 6.19): как должна выглядеть черная дыра и окружающий ее горячий аккреционный диск.

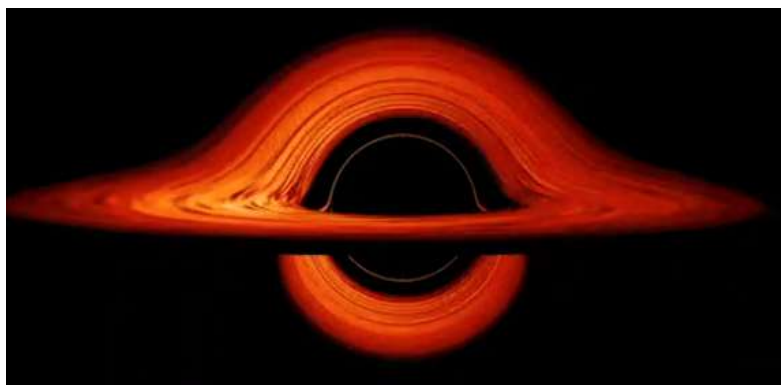


Рис. 6.19. Теоретическая модель окрестности сверхмассивной черной дыры

Радиоинтерферометр имеет интересное название: *ЕНТ* – *Event Horizon Telescope* «Телескоп горизонта событий». Горизонтом событий называют поверхность черной дыры.

Физикам очень важно понять, как работает теоретическое представление о гравитации и как оно реализуется в природе.

6.2. Внеатмосферная астрономия

Внеатмосферная астрономия подразумевает изучение космических объектов с борта космических аппаратов. Речь пойдет о коротковолновом излучении, которое полностью или почти полностью поглощается в атмосфере, из-за чего телескопы не могут принимать такие сигналы.

На рисунке 6.20 продемонстрировано насколько важно изучать космические объекты в разных диапазонах излучения. На фотографиях показана одна и та же область неба в разных диапазонах:

- видимый свет: виден Млечный путь, звезды, темные участки возникают, когда перед взглядом оказываются непрозрачные холодные газопылевые облака;
- ближний инфракрасный свет: облака почти незаметны – инфракрасный свет легче проходит сквозь пылинки, которые поглощают видимый свет, но не способны до конца поглотить инфракрасный;
- дальний инфракрасный свет: в местах, где были темные участки при видимом свете, появилась яркость – сами пылинки, нагретые звездным светом, свяжутся в дальнем инфракрасном диапазоне (их температура 250-300 K);
- линия излучения водорода $H\alpha$: фотография сделана в одной спектральной линии оптического диапазона, $H\alpha$ – линия излучения теплого межзвездного водорода – видны яркие пятна, которые говорят о том, где находятся горячие звезды, которые нагрели вокруг себя межзвездный газ и заставили его светиться.



Рис. 6.20. Участок Млечного Пути в разных диапазонах излучения

Таким образом, используя различные диапазоны излучения, астрономы узнают о разных объектах в одной и той же области.

Оптический космический телескоп.

Существует несколько телескопов, которые были созданы для помощи космическому телескопу «Хаббл». Один из них – это TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*), в конструкции телескопа предусмотрено 4 камеры, поле зрения каждой $24^\circ \times 24^\circ$. Этот телескоп более широкоугольный, чем Хаббл (рис. 6.22). Хаббл имеет зеркало диаметром 2.5 м.

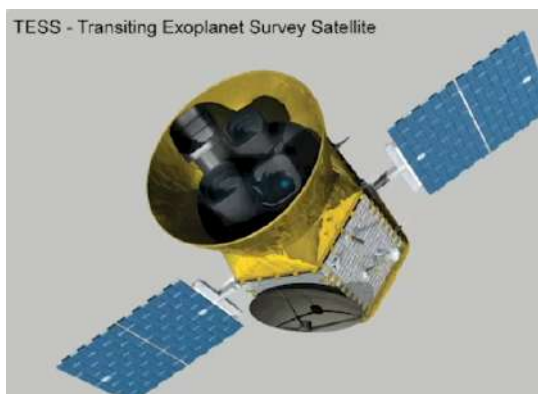


Рис. 6.21. Оптический космический телескоп TESS



Рис. 6.22. Космический телескоп «Хаббл» (NASA)

На смену космическому телескопу «Хаббл» придумали следующий оптический телескоп – «Джеймс Уэбб» (NASA) (рис. 6.23). Конструкция имеет размеры соизмеримые с размерами баскетбольной площадки. Именно поэтому она складная. В настоящее время, с данным телескопом проводят эксперименты и пока не отправляют его в космос.

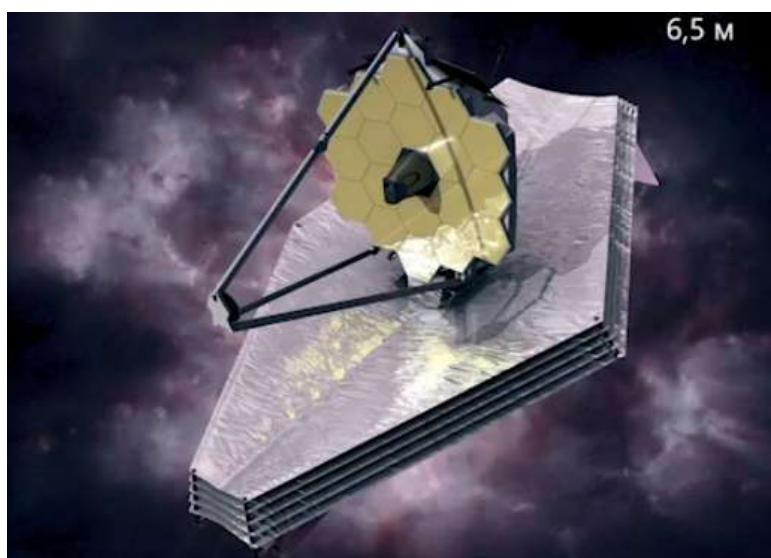


Рис. 6.23. Космический телескоп «Джеймс Уэбб» (NASA)

Инфракрасная астрономия

На рисунке 6.24 показан типичный инфракрасный телескоп – *IRAS*.



Рис. 6.24. Инфракрасный телескоп в космосе – *IRAS*

Телескопы имеют довольно странную конструкцию: телескоп должен принять тепловое излучение далеких космических объектов, но сам он тоже теплый, т.к. его нагревает Солнце. Если внутри него будет высокая температура, то телескоп будет регистрировать собственное внутреннее свечение. Именно поэтому инфракрасные телескопы сделаны следующим образом: основная капсула представляет собой большой холодильник (сосуд Дьюара), заправленный холодным газом (жидким водородом или жидким гелием). Внутри сосуда помещен инфракрасный телескоп, который охлаждается почти до абсолютного нуля (-273°C). Инфракрасный телескоп, не излучая собственного инфракрасного света, хорошо регистрирует слабый инфракрасный сигнал, приходящий из космоса. Однако, холодный газ довольно быстро испаряется, даже не смотря на то, что на телескопе предусмотрена специальная солнечная панель, которая создает тень. По этой причине первые инфракрасные телескопы работали только по несколько месяцев. Телескопы последнего поколения работают по несколько лет.

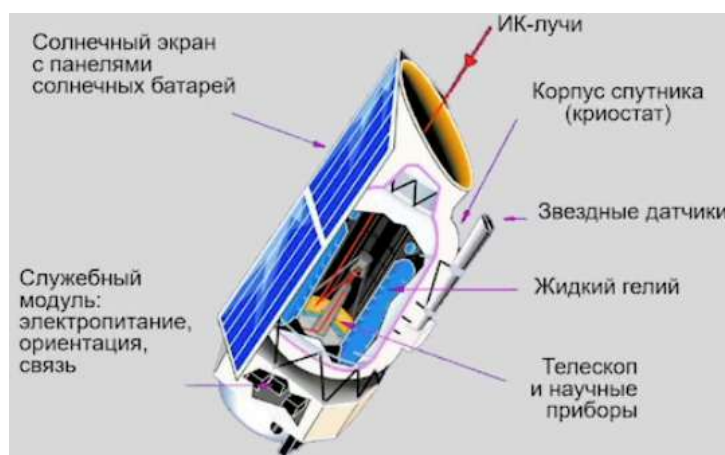


Рис. 6.25. *ISO – Infrared Space Observatory (NASA, 1995-1998)*

Инфракрасные телескопы дают возможность заглянуть в недра пылевых и газовых холодных облаков, таких как туманность Ориона и других. На рисунках 6.26 и 6.27 показана Туманность Ориона (M42) в оптическом и в инфракрасном диапазонах.



Рис. 6.26. Туманность Ориона (M42) в видимом диапазоне излучения



Рис. 6.27. Туманность Ориона (M42) в видимом и ИК диапазоне излучения

На снимке в видимом и инфракрасном диапазоне излучения более четко видны тонкие детали и структуры.

Рентгеновская астрономия

Рентгеновские лучи проходят практически через любое вещество. Их нельзя сфокусировать ни с помощью линзы, ни с помощью зеркала.

Оказалось, что если рентгеновский квант падает под небольшим углом на металлическую поверхность, то он отражается как от обычного зеркала. Этот процесс очень похож на отражение при косом падении камня на поверхности воды. Такая же конструкция и у рентгеновских телескопов – это набор цилиндров гиперболической и параболической формы, которые под малым углом способны отражать и фокусировать рентгеновские кванты.

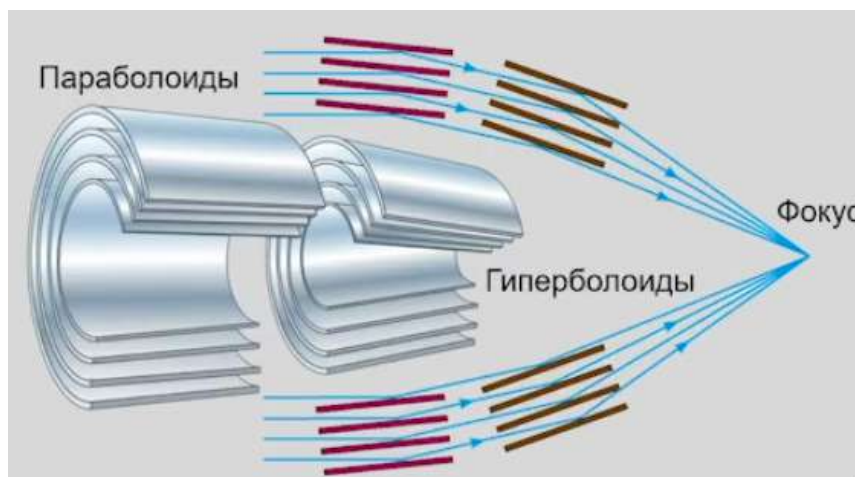


Рис. 6.28. Зеркала косого падения для «мягких» рентгеновских квантов

Рентгеновские телескопы работают только на орбите, так как сквозь атмосферу Земли рентгеновское излучение не проходит.

Самый известный рентгеновский телескоп – телескоп «Чандра». Название телескопу дано в честь индийско-американского астрофизика, лауреата Нобелевской премии – Субраманьяна Чандрасекара.



Рис. 6.29. Космический рентгеновский телескоп «Чандра» (NASA)

Результат работы рентгеновских, ультрафиолетовых и оптических телескопов, которые могут один и тот же объект, в данном случае – остаток взрыва сверхновой

звезды. С помощью телескопов удалось наблюдать ее в разных диапазонах. Складывая все изображения, можно получать многоцветное, а главное, информативное изображение (рис. 6.30, рис. 6.31). Цвет несет информацию о том, где горячий газ, а где холодный, какие химические элементы светятся.

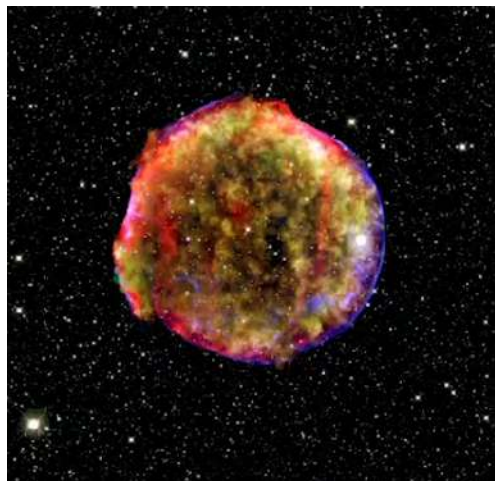


Рис. 6.30. Остаток сверхновой Тихо Браге, 1572 г. В инфракрасном, видимом и рентгеновском диапазонах излучения



Рис. 6.31. Остаток сверхновой Кассиопея А

Гамма-астрономия

Самые жесткие гамма-лучи нельзя сфокусировать. На рисунке 6.32 показан космический телескоп гамма-диапазона.



Рис. 6.32. Гамма-телескоп с кодированной маской

Перед регистрирующей аппаратурой находится специальная маска, в которой много разных отверстий и которая бросает тень на регистрирующую аппаратуру. Гамма

кванты не проходят в некоторых местах и застревают, а через отверстия – проходят и попадают на приемник излучения.

На рисунке 6.33 показана аналогичная ситуация: стоит человек и его тело отбрасывает две тени. Благодаря теням можно понять месторасположение источников света. Аналогично работает устройство в гамма-телескопе.

На рисунке 6.34 показан спутник «Радиоастрон», созданный в России. С помощью него были получены тонкие, с высоким угловым разрешением изображения космических объектов в радио-диапазоне на длине волны до 3 см. Диаметр антенны «Радиоастрона» составляет 10 м. Радиотелескоп удалялся от Земли на 300 000 км и, таким образом, расширял базу интерферометра наземно-космического.



Рис. 6.33. Месторасположение источников света, определенное по положению тени



Рис. 6.34. «Радиоастрон» - элемент космического интерферометра



Рис. 6.35. Радиотелескоп в космосе

Урок 7. Излучение небесных тел. Звездные величины

Астрономы анализируют излучение, которое рассказывает о составе, положении и движении космических объектов. Ничего, кроме электромагнитного излучения астрономы не получают от космических тел, однако очень редко от них прилетают материальные частицы, которые называются *космической радиацией*.

7.1. Излучение небесных тел

На любой фотографии неба (рис. 7.1) видны яркие области, темные и полутемные области. Их графический вид, состав излучения, его поляризация, цвет могут дать нам информацию о тех космических телах, которые видны на снимке. В этом заключается работа астронома:

- 1) Создать изображение космического объекта.
- 2) Изучить и проанализировать полученное изображение.



Рис. 7.1. Излучение небесных тел

Электромагнитный спектр

В основном астрономы занимаются изучением оптического света. Прежде всего, потому что атмосфера Земли в нем прозрачная. Информацию также приносит и инфракрасное, и ультрафиолетовое, и рентгеновское излучение, но в сильно меньшей степени. Свет по-прежнему является главным источником информации.

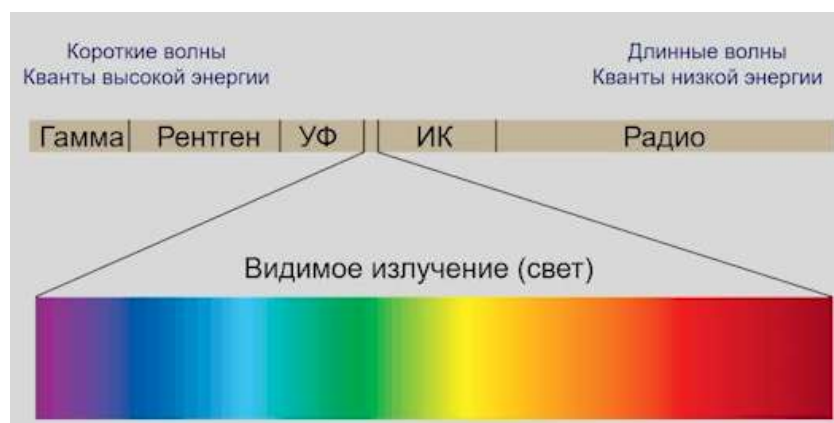


Рис. 7.2. Электромагнитный спектр

Весь электромагнитный диапазон обычно разбивают на более мелкие диапазоны. В физике эти разбиения очень мелкие. У астрономов разбиения не такие мелкие и скорее связаны с возможностями: что видно на Земле, а чего нет. Диапазоны, которыми пользуются астрономы собраны в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Электромагнитный спектр

Область спектра		Длина волны
Радио		>1 мм
ИК	Дальний	500 – 1000 мкм
	Средний	2,5 – 50 мкм
	Ближний	0,76 – 2,5 мкм
Видимое излучение		390 – 760 нм
УФ	Ближний	310 – 390 нм
	Дальний	10 – 310 нм
Рентгеновские лучи		0,01 – 10 нм
Гамма-лучи		$< 0,01$ нм

Ближний инфракрасный диапазон не виден глазу человека. Однако, дома, в бытовых условиях, ближний инфракрасный свет можно сделать видимым – для этого можно взять пульт управления телевизором, которые передает информацию приемнику в ближнем инфракрасном диапазоне. На каждом пульте на передней боковой панели есть лампочка со светодиодом, его вспышку человек наблюдать не может. Однако, есть маленькая хитрость: фотокамера сотового телефона (ПЗС-матрица) чувствительна к ближнему инфракрасному свету. Если навести пульт в объектив камеры телефона, то можно увидеть вспышку. Таким образом, камера сотового телефона – это приемник инфракрасного излучения.

Лучи, приходящие от космического объекта, могут рассказать, прежде всего, о его температуре: чем выше температура, тем белее, почти голубое свечение у нагретого объекта – красный цвет характерен для менее нагретых тел, желтое излучение характерно для сильно нагретых тел, голубое – для еще более нагретых тел. Например, если нагреть кочергу в печи, то менее ее нагретая часть, почти у самой рукояти – будет красной, далее, по мере увеличения температуры, цвет с красного будет меняться к желтому и далее будет переходить во все более белый.

Таким образом, астрономы изучают состав волны приходящего света по длине волны и делают выводы о температуре.

На рисунке 7.3 показан график электромагнитного спектра: по горизонтальной оси отмечена длина волны в нанометрах, по вертикальной оси – относительная интенсивность света, приходящего на данной длине волны. Красным цветом, с отмеченной температурой в 4000 К, характеризуются красные карлики. Температура в

6000 K соответствует Солнцу. Более горячие звезды в ультрафиолетовой области светятся. Так спектральный состав, даже грубо проанализированный, может дать нам информацию о температуре поверхности космического объекта.



Рис. 7.3. Электромагнитный спектр

7.2. Звездные величины

От далеких звезд приходит мало света, от более близких, крупных и горячих звезд — больше света. Таким образом, каждая звезда представлена на небе точкой своей собственной яркости. Некоторые из них ярче и заметны глазом, другие менее заметны.

Идея разделить звезды на несколько групп по яркости (астрономы говорят — «по блеску») принадлежит древнегреческому астроному Гиппарху (II век до н. э.). Если эту характеристику будет описывать физик, то он назовет ее *поток излучения* — какая мощность света падает на зрачок глаза, так интуитивно воспринимается яркость звезды.

Яркость — не самый удачный термин, так как яркостью называется блеск протяженных объектов.

Гиппарх все видимые глазом звёзды разделил на 6 классов — от 1-й до 6-й звёздной величины. Самые яркие обозначены как 1^m , а самые тусклые (астрономы говорят — «слабые») обозначены как 6^m . Индекс m происходит от латинского *magnitudo* — величина.

Принцип нумерации звёздных величин похож на расстановку спортсменов на пьедестале: чем ярче звезда, тем меньше номер её места на шкале звёздных величин.

Многие века человеческий глаз (рис. 7.4) служил единственным приемником света. К середине 19 века стали использовать приборы, которые фиксировали потоки света, приходящие от небесных светил (рис. 7.5).



Рис. 7.4. Глаз человека

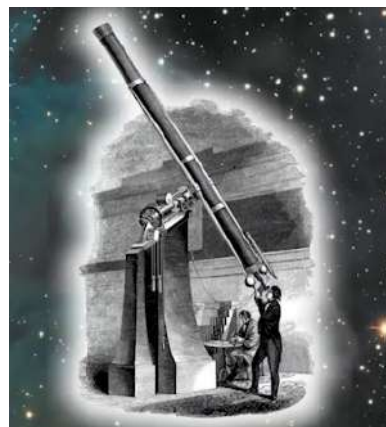


Рис. 7.5. Первые телескопы

Первым астрономом, который стал измерять яркость звезд с помощью специального фотометра был Норман Погсон (рис. 7.6). Его измерения показали, что потоки света от звёзд соседних звёздных величин различаются примерно в 2,5 раза, а различие между 1^m и 6^m составляет почти точно 100 раз.

Следовательно, шкала звёздных величин – геометрическая прогрессия. Погсон предложил взять за основание шкалы звёздных величин $\sqrt[5]{100} \approx 2,512 \dots$

Общая математическая формула для вычисления разности звездных величин – *Формула Погсона*:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \lg \left(\frac{L_2}{L_1} \right)$$

Описание формулы: десятичный логарифм отношения потоков света умноженные на 2.5 дает разность звездных величин m_2 и m_1 .

В середине 19 века появилась фотография и изображения стали фиксироваться более четко.



Рис. 7.6. Норман Погсон (1829-1891)



Рис. 7.7. Фотопластинка

Фотопластинка, которую держит в руках Владимир Георгиевич Сурдин (рис. 7.7) в негативе: изображение звезд темное на светлом фоне. Астрономы привыкли работать с негативными изображениями, чтобы не терять информацию.

Звёздные величины могут быть и целые, и дробные, и даже отрицательные (если светило очень яркое).

Многие путают понятия *созвездия* и *астеризма*. «Ковш» – это не все созвездие Большой Медведицы, а ее небольшая часть. Наиболее четкая геометрическая фигура, которая складывается из ярких звезд, называется *астеризмами*. Именно поэтому «Ковш» (рис. 7.8) – это астеризм и небольшая часть созвездия.

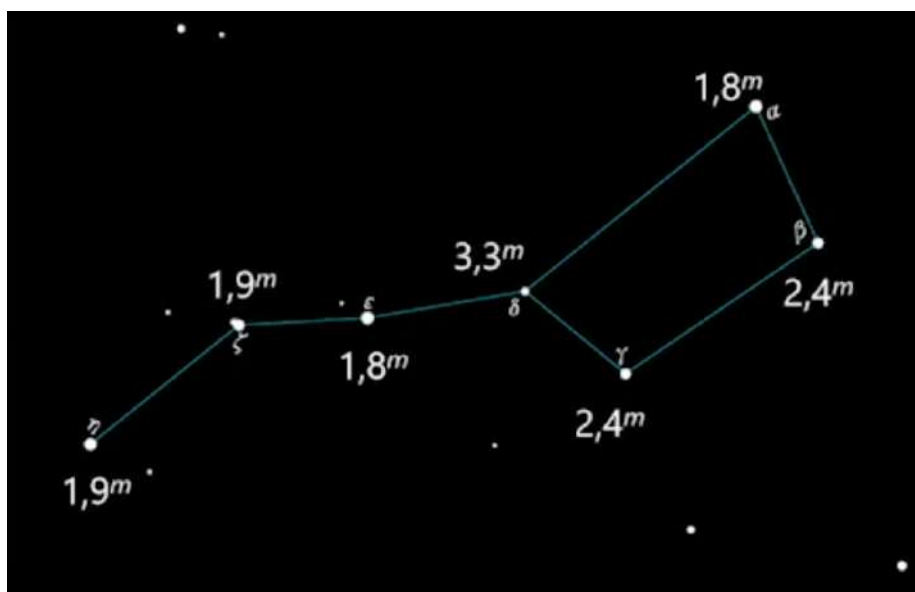


Рис. 7.8. Астеризм «Ковш» в созвездии Большая Медведица

На звездах «Ковша» отмечены звездные величины. Для отметки звездной величины используют верхний символ *m*. Важно, что индекс набран курсивом. На рисунке 7.8 видно, что в «Ковше» Большой Медведицы не самые яркие звезды. Самые яркие звезды имеют первую, или даже нулевую звездную величину. Звезда второй звездной величины в 2,5 раза менее яркая, чем звезда первой величины.

Не только звездам можно приписать звездные величины, а, например, и звездным скоплениям, которые могут содержать тысячи звезд. Звездная величина будет суммой потоков звезд от всех его членов. На серии снимков 7.9 – 7.10 астрономами был прослежен полет кометы (выделена красным кругом). В разные моменты времени ее точка становилась все ярче и ярче. На каждой фотографии, сравнивая изображения кометы с изображением известных звезд, можно сказать, какую звездную величину имела комета в данный момент времени.

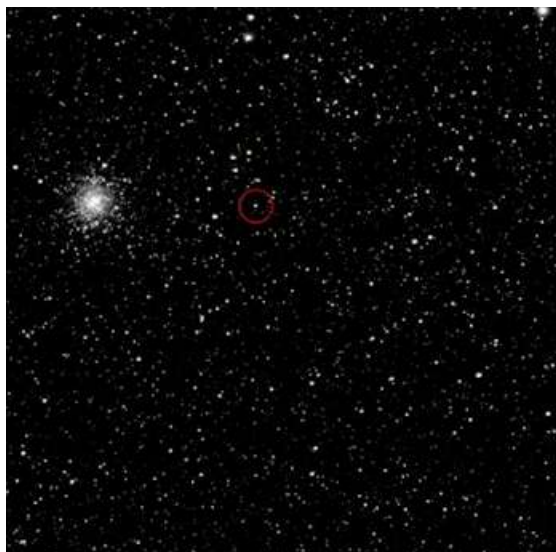


Рис. 7.9. Звездные скопления. Пролет кометы – снимок 1.

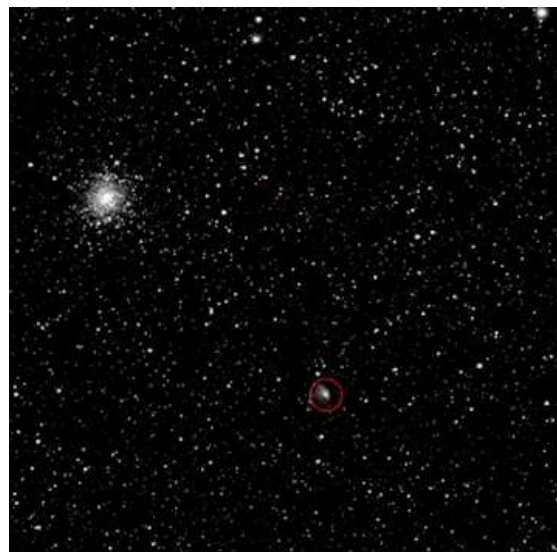


Рис. 7.10. Звездные скопления. Пролет кометы – снимок 2

Иногда не хватает шкалы целых натуральных чисел, чтобы выразить звездную величину какого-то яркого объекта. Глазами человек может увидеть звезды от первой до пятой величины. Существуют звезды нулевой величины, которые ярче, чем звезды первой величины. Также существуют звезды отрицательной звездной величины (рис. 7.11).

Например, у Венеры иногда бывает -4 или даже -5 звездная величина. Именно поэтому приходится расширять шкалу в область отрицательных значений, чтобы описать яркость объектов.

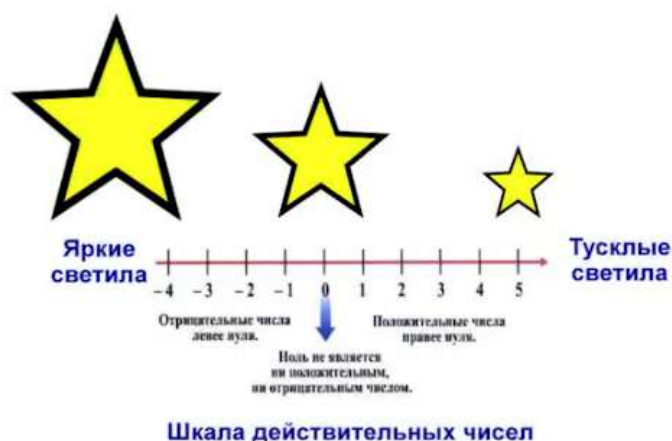


Рис. 7.11. Звездные величины

В таблице 7.2 показан весь диапазон звездных величин и какие объекты им соответствуют. Абсолютно яркий объект – это Солнце, которое имеет значение звездной величины почти -27^m . Луна в полнолунии имеет значение почти -13^m – это намного слабее Солнца, но намного ярче, чем другие звезды. Человеческому глазу в

нормальных условиях, за городом, доступны звезды, имеющие блеск до 6 звездной величины. В некоторых случаях видны и яркие звезды, если, например, смотреть на звезды высоко в горах. Существуют люди с уникальной чувствительностью зрения, которые способны увидеть звезды до $7,5^m$ звездной величины.

Самые рекордные фотоснимки, полученные телескопом «Хаббл» при очень долгой экспозиции показали звезды, имеющие звездные величины до 32^m . Разница между крайними значениями в таблице – около 60 звездных величин. Каждые пять звездных величин – это изменение потока в 100 раз, тогда 60 звездных величин – это разница в изменении потока от Солнца до самых незаметных звезд в 10^{24} .

Динамический диапазон зрения человека 10^{13} раз. Диапазон рассчитан исходя из того, что человек может посмотреть на Солнце, имеющее звездную величину около -27^m и увидеть звезды до 6^m .

На данный момент не существует ни одного телескопа, имеющего такой широкий диапазон.

Таблица 7.2. Звездные величины

Диапазон звездных величин	Объекты
от -27^m до -15^m	Солнце в Зените ($-26,8^m$)
от -15^m до -5^m	Полная Луна ($-12,7^m$)
от -5^m до 0^m	Венера ($-4,4^m$), Сириус ($-1,5^m$), Канопус ($-0,7^m$), α Кентавра ($-0,3^m$)
до 6^m	Доступны невооруженному глазу человека в хороших условиях
до 27^m	Доступны наземному телескопу
до 32^m	Доступны космическому телескопу

Рассмотрим подобные шкале звездных величин шкалы в таблице 7.3. Так, например высоту звука измеряют в октавах, шкала мощности землетрясений измеряется по шкале Рихтера-Меркалли и т.д. Шкала гениальности физиков – шуточная, однако тоже измерялась в логарифмическом масштабе.

Таблица 7.3. Логарифмические шкалы

Явление	Шкала
Громкость звука	Бел (децибел)
Высота звука	Октава
Землетрясения	Шкала Рихтера-Меркалли
Сила ветра	Шкала Бофорта
Астероидная опасность	Туринская и Палермская шкалы

Гениальность физика	Шкала Ландау
Химическая чувствительность	Шкала кислотности (<i>pH</i>)

Все шкалы имеют логарифмический масштаб закономерно.

Широкий динамический диапазон глаза связан с тем, что в сетчатке глаза природный компьютер логарифмирует мощность сигнала и передает в мозг не пропорционально сигналу, а пропорционально логарифму мощности сигнала, что значительно сужает диапазон шкалы и мозг не перегружается.

Закон Вебера – Фехнера

Наша склонность к логарифмическим шкалам имеет физиологическое обоснование на уровне органов чувств.

Французский физик Пьер Бугер (1698-1758) заметил, что глаз фиксирует относительное различие яркости поверхностей.

Немецкий физиолог Эрнст Вебер (1795-1878) установил, что мышцы и кожа воспринимают не абсолютное, а относительное изменение силы раздражителя.

В 1858 г. немецкий физик и психолог Густав Фехнер (1801-1887) сформулировал это в математической форме:

$$S = a \lg I + b,$$

где S – интенсивность ощущения, I – сила раздражителя.

Психофизиологический закон Вебера – Фехнера:

1. Ощущение пропорционально логарифму раздражения.
2. Если раздражение меняется в геометрической прогрессии, то ощущение – в арифметической.

Литература

Рекомендуемая литература: «Понятная Вселенная» (Сурдин В.Г.).



Рис. 7.12. Понятная Вселенная. Автор: Сурдин В. Г.

Урок. 8. Спектры небесных тел. Эффект Доплера

Астрономы анализируют состав света, его цветовой (спектральный) состав. Благодаря этой информации можно получить представление о природе космических объектов.



Рис. 8.1. Солнце в момент солнечного затмения и его цветовой (спектральный) состав верхних слоев атмосферы

8.1. Принцип работы спектрографа. Спектры излучения и поглощения

Спектр – это цветная полоска, которую получают с помощью специального прибора спектроскопа/спектрографа.

Цвет многих объектов несет важную информацию об их природе (рис. 8.2). Если человек видит зеленые плоды на плодовом дереве, то он делает вывод, что они еще не созрели и есть их пока нельзя. Если человек видит красные плоды, то это значит, что их можно употребить. В зависимости от того, насколько оттенок красный или более желтоватый, человек судит о степени зрелости. Таким образом, цвет – это индикатор внешних свойств объекта.

Научное исследование цветового состава начинается с Исаака Ньютона (1643-1727) (рис. 8.3). Он первым стал систематически исследовать свет, расщепляя белый луч Солнца с помощью стеклянной призмы на составляющие цвета.

Свет, излучаемый природными источниками, как правило, содержит широкий набор цветов, т. е. квантов разных энергий или электромагнитных волн разной длины. Анализ цветового состава света позволяет многое узнать о природе его источника.



Рис. 8.2. Цвет – индикатор свойств

Рис. 8.3. Исаак Ньютон (1643 – 1727)

Спектральный анализ света

Стеклянная призма (рис. 8.4) – один из приборов для спектрального (т.е. цветового) анализа света. Если призма из прозрачного материала (кварц, горный хрусталь, обычное или специальное стекло), то входя в нее белый луч света преломляется на одной ее грани, т.к. проходит границу сред, проходит сквозь тело, переходит вновь из одной среды в другую, снова преломляется и меняет свое направление. Направление меняется в зависимости от того, какой цвет у этого луча. Белый луч – это смесь лучей разного цвета. Красный длинноволновый свет преломляется меньше всех, фиолетовый коротковолновый свет преломляется больше всех.

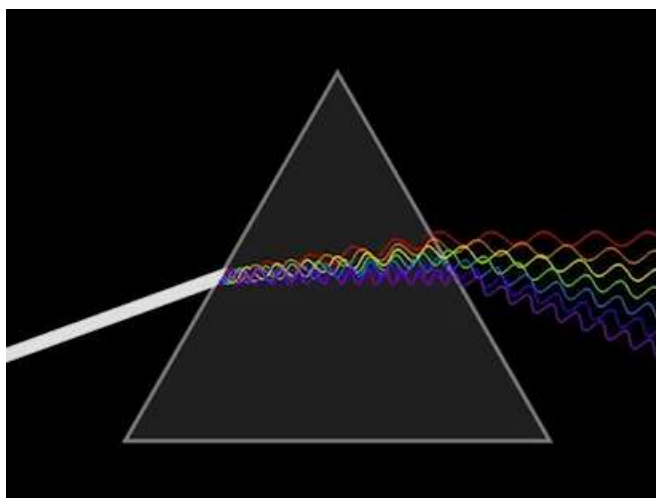


Рис. 8.4. Стеклянная призма

Настоящий спектр не так четко разделен, как на рисунке 8.4 – на самом деле переходы более плавные и границ между переходами нет (рис. 8.5). Самый коротковолновый луч (фиолетовый) имеет длину волны 400 нм, самый длинноволновый луч (красный) имеет длину волны 700 нм.

Глаз человека видит все цвета от красного до фиолетового, т. е. с длиной волны от 700 до 400 нанометров.

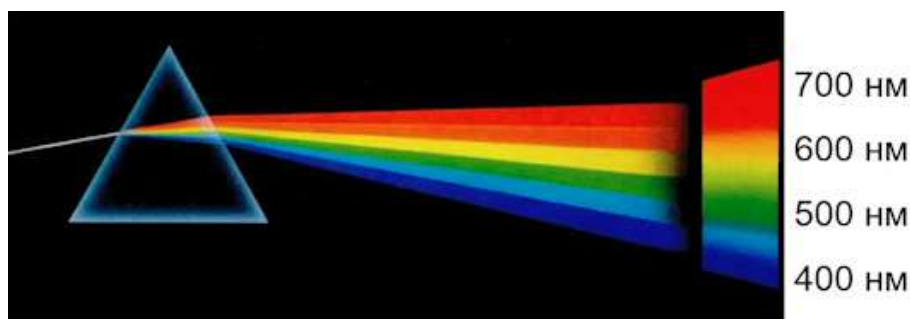


Рис. 8.5. Спектральный анализ света

По цвету объекта можно судить о его температуре (рис. 8.6). Но цвета, как средней характеристики – недостаточно. Необходимо детально исследовать, как распределена мощность приходящего излучения по длине волны. Это оказалось полезным астрофизическим методом.

В начале 19 века французский философ Огюст Конт (рис. 8.7) утверждал, что никто никогда не узнает, из чего сделаны звезды: «Мы допускаем возможность определить их форму, расстояние до них, их размеры и траектории их движения, в то же время мы никогда не узнаем, как и каким образом выяснить их химический состав или их минералогическое строение и тем более природу любых организованных существ, которые, вероятно, живут на их поверхности».

Огюст Конт – французский философ, родоначальник позитивизма, основоположник социологии как самостоятельной науки.

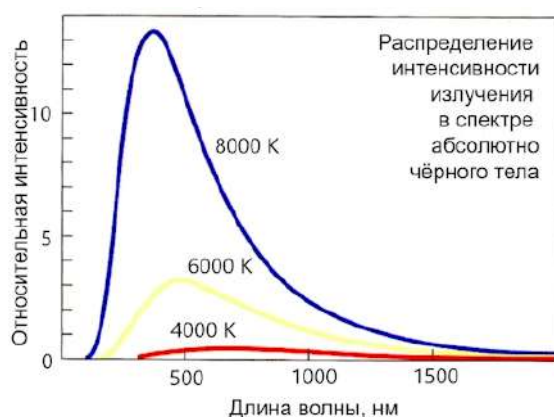


Рис. 8.6. Распределение интенсивности излучения в спектре абсолютно черного тела



Рис. 8.7. Огюст Конт (1798 – 1857)

Оптический спектр типичной звезды.

Через несколько лет после утверждения Огюста Конта физики и химики обнаружили, что в спектре Солнца присутствуют темные линии. Открытие было сделано в 1802-1814 гг. двумя учеными (рис. 8.8 и рис. 8.9) независимо друг от друга.



Рис. 8.8. Йозеф Фраунгофер (1787 – 1826), немецкий физик и оптик

Рис. 8.9. Уильям Волластон (1766 – 1828), английский химик

Ученые стали дальше изучать это явление. Так в 1858 – 1860 гг. родился спектральный анализ длины. Основы спектрального анализа длины света создали Густав Кирхгоф и Роберт Бунзен. Они изучали свечение разных веществ в лаборатории.



Рис. 8.10. Густав Кирхгоф (1824 – 1887) и Роберт Бунзен (1811 – 1899), Германия

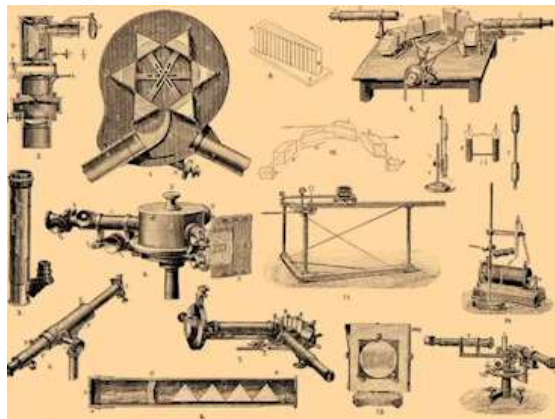


Рис. 8.11. Приборы Г. Кирхгофа и Р. Бунзена

Вместе ученые поняли, что каждое химическое вещество светится своим набором цветов.

На рисунках 8.12 – 8.14 показана самая простая схема спектрографа: стеклянная призма, перед которой стоит экран с узкой щелью. Если будут присутствовать темные линии – цвета нет, если же цвет идет в избытке, то линия будет яркой.

Горячее непрозрачное тело излучает свет, в котором присутствуют все цвета. Его спектр непрерывный – нет разрыва в цветах.

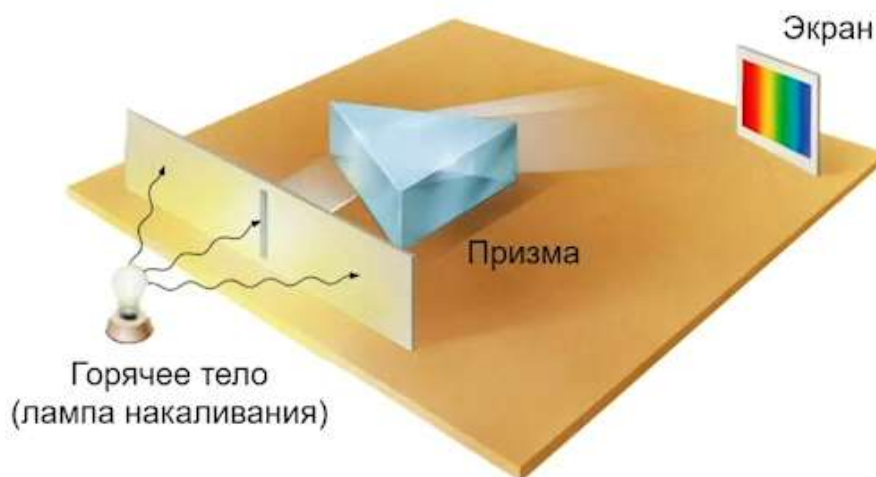


Рис. 8.12. Спектрограф. Источник излучения – горячее тело

Рассмотрим другой источник света – горячий газ (рис. 8.13), который излучает кванты нескольких фиксированных энергий (длин волн) в зависимости от химсостава

газа. На спектре видны темные полосы, так как каждый атом излучает на присущих ему энергиях излучения. Яркие линии – эмиссионный спектр.

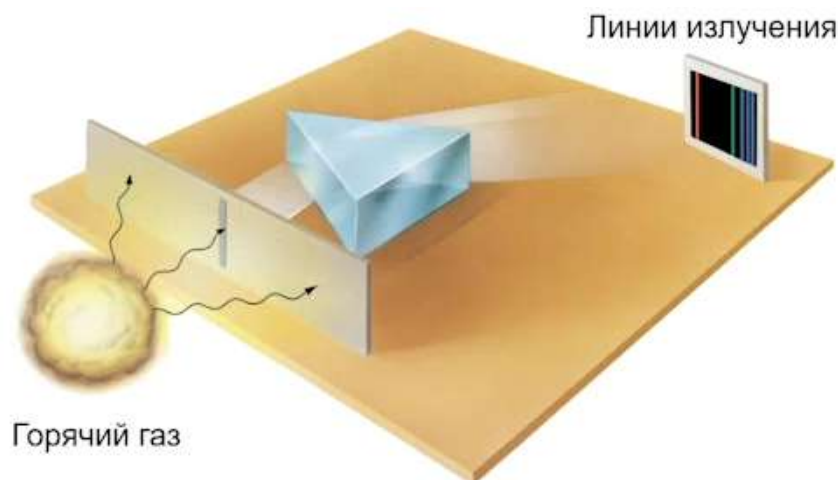


Рис. 8.13. Спектрограф. Источник излучения – горячий газ

А теперь рассмотрим ситуацию, когда два источника совмещены: свет лампы со спиралью накаливания, которая дает непрерывный спектр, проходит сквозь облако холодного газа. Атомы холодного газа будут перехватывать те кванты, которые характерны для атомов данного газа, а другие пропустят. На фоне непрерывного спектра будут видны темные линии.

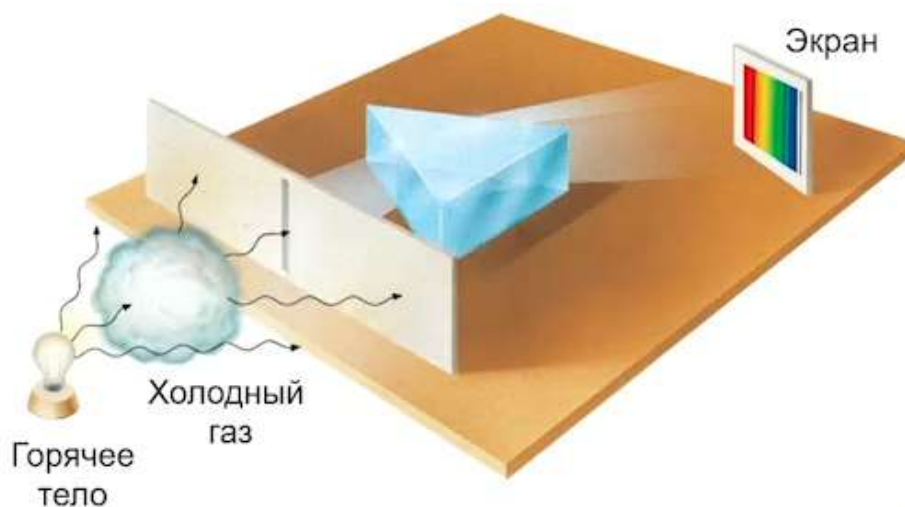


Рис. 8.14. Спектрограф

Таким образом, спектр может быть или эмиссионным, или поглощения.

Спектры излучения и поглощения

Рассмотрим спектр излучения натрия (рис. 8.15). Известно, что у химического элемента *Na* в оптической области есть две яркие линии, так называемый желтый дублет натрия.

В бытовых условиях (на кухне) можно проделать следующий опыт: взять натрий, который содержится в составе поваренной соли ($NaCl$) и посыпать его немного на газовую конфорку. Тогда $NaCl$ расщепится на Na и Cl , и натрий ярко вспыхнет желтым светом.

Если через пары натрия пропустит яркий всевозможных длин волн, то натрий поглотит желтые кванты и не пропустит их дальше.

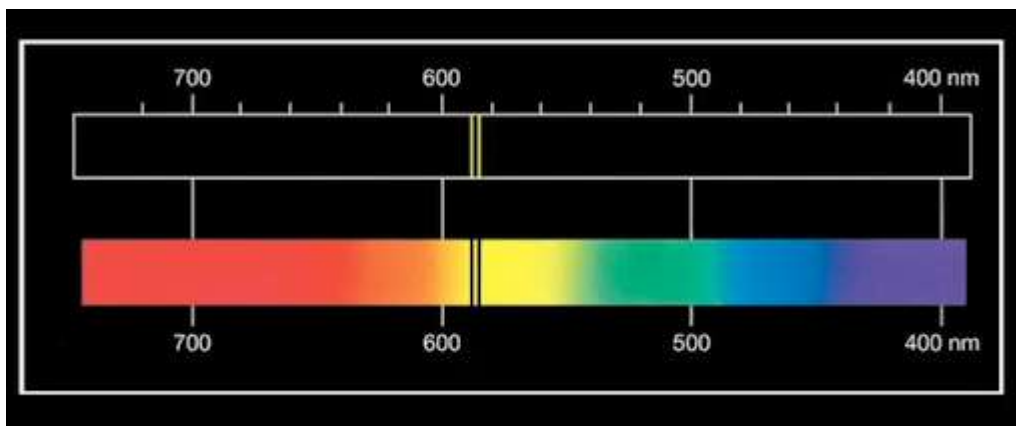
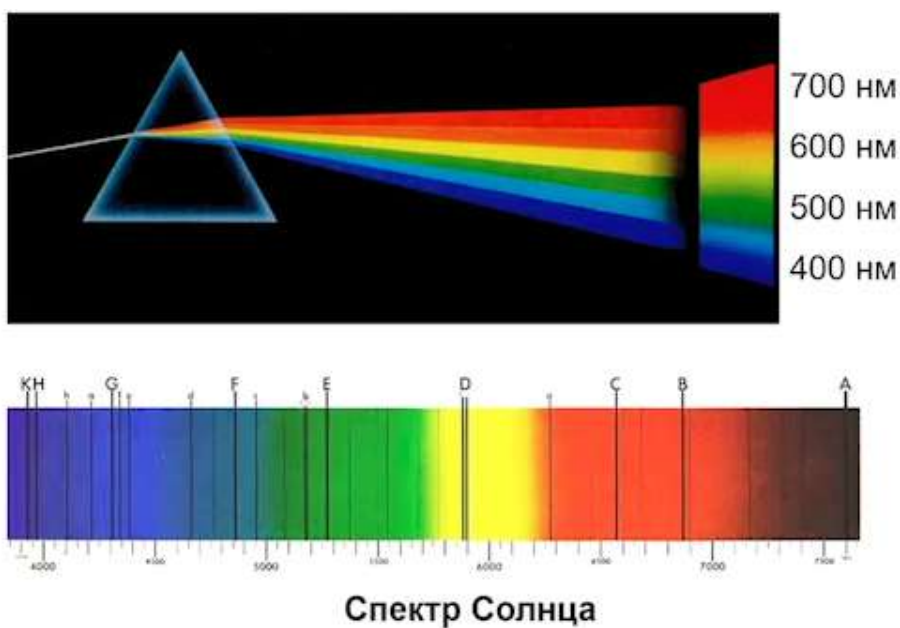


Рис. 8.15. Спектр натрия

Таким образом можно фиксировать состав светящихся тел.

Спектрограф дает возможность проанализировать химический состав Солнца (рис. 8.16). Если солнечный луч пропустить через спектрограф, то получится спектр излучения поверхности Солнца. Желтый дублет натрия хорошо виден в спектре Солнца.

Темные линии обозначены буквами латинского алфавита Фраунгофером, которые первый их увидел.



Спектр Солнца

Рис. 8.16. Спектр Солнца

Спектры чистых газов показаны на рисунке 8.17. Если газ нагреть в колбе, можно увидеть совершенно разные спектры, в зависимости от химических элементов. Так как газы всегда находятся в смеси, то идеальной ситуации, как на рисунке 8.17 – не бывает, однако всегда можно понять, какие линии к какому конкретному элементу принадлежат и в каком он состоянии.

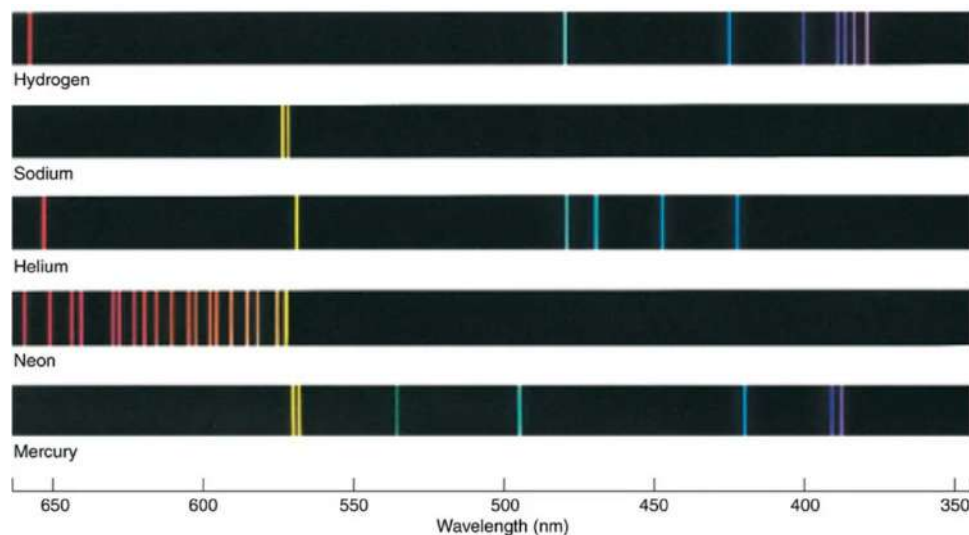


Рис. 8.17. Спектры газов

После исследования спектров различных веществ, астрономы стали на телескопы добавлять конструкцию спектрографа (рис. 8.18).

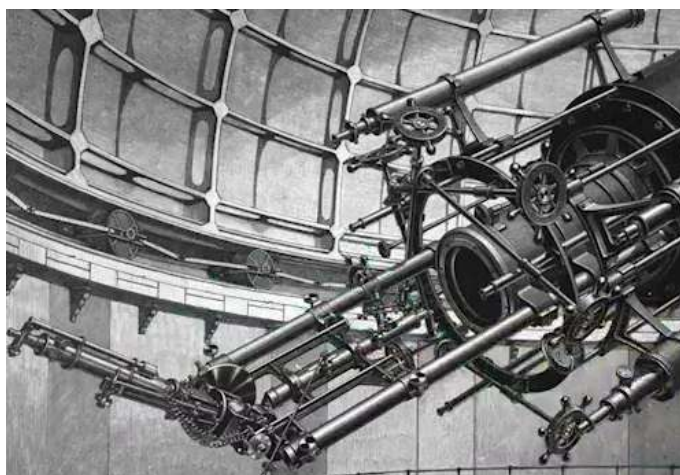


Рис. 8.18. Телескоп со спектрографом

8.2. Эффект Доплера

Оказалось, что спектр излучения может рассказать не только о химическом составе, но и о движении объекта – движущийся источник колебаний может по-разному отправить волны в разных направлениях.

Движущийся по поверхности воды источник волн демонстрирует эффект Доплера (рис. 8.19): волны, уходящие в противоположном направлении, имеют большую длину, чем волны идущие в направлении движения самого источника. Этот эффект был открыт сначала в области акустики (звука). Но полной аналогии со светом в этом опыте нет.

Эффект Доплера: если есть источник света и он излучает с постоянной частотой, то его приближение к наблюдателю приводит к тому, что наблюдатель воспринимает его как более коротковолновый (рис. 8.20) – более голубое излучение; если наблюдатель находится позади удаляющегося источника, то до него волна доходит растянувшись (красного цвета).

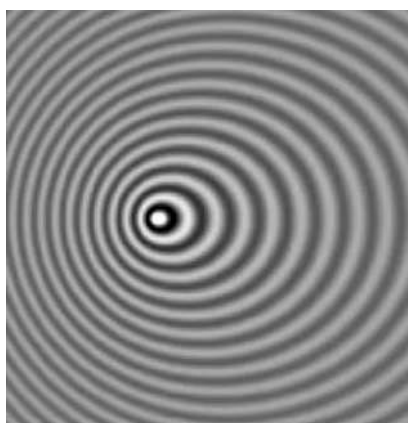


Рис. 8.19. Эффект Доплера на поверхности воды

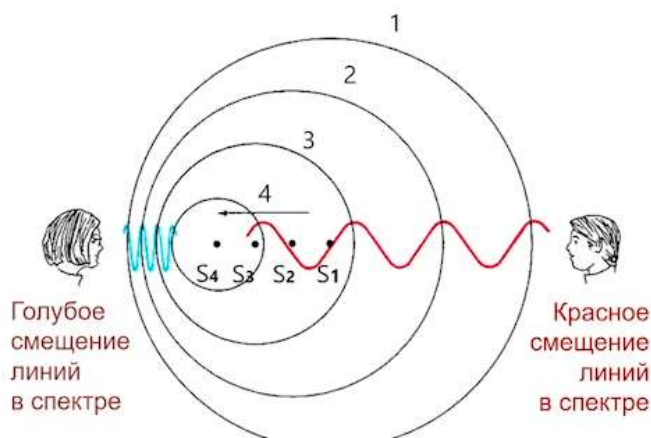


Рис. 8.20. Эффект Доплера

На рисунке 8.21 показано изменение структуры линий в спектре какой-то звезды, если она движется. При удалении источника линии в его спектре смещаются в красную сторону, т. е. их длина волны увеличивается. По этим данным можно судить о скорости перемещения звезды.

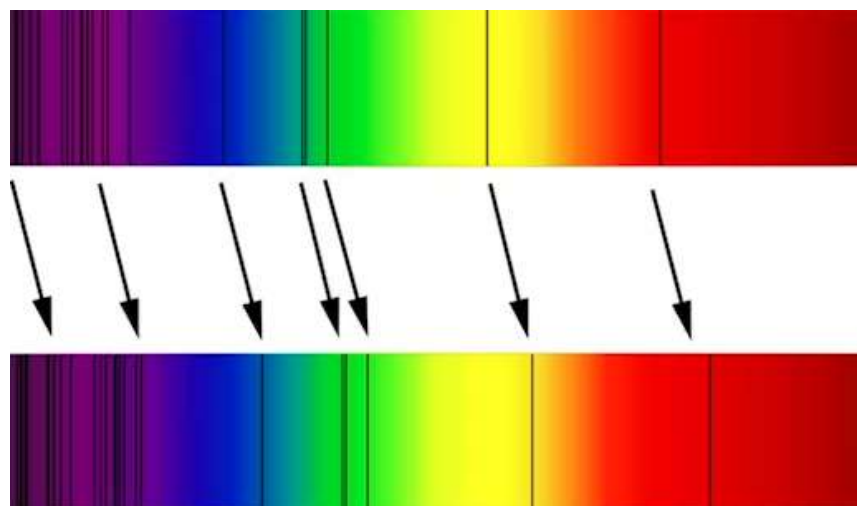


Рис. 8.21. Эффект Доплера

Таким образом, эффект Доплера помог астрономам измерять не только химический состав и температуру поверхности звезды/планеты, но и ее движение вдоль луча зрения. Движение поперек – не очень сильно изменяет спектр – изменения происходят, но это считается эффектом второго порядка, связанным с релятивистской физикой, с теорией относительности. Если астрономы научатся точнее измерять смещения вдоль луча, тем меньшие скорости можно будет фиксировать.

Уже в середине 20 века астрономы по доплеровскому смещению линий в спектре звезд умели измерять скорости с ошибкой примерно 10 км/с – это хорошая точность. К 1980-м годам научились измерять с ошибкой 1 км/с, или даже 0,5 км/с. Самые опытные спектроскописты-астрофизики в конце 20 века достигли точности измерения в метры в секунду.

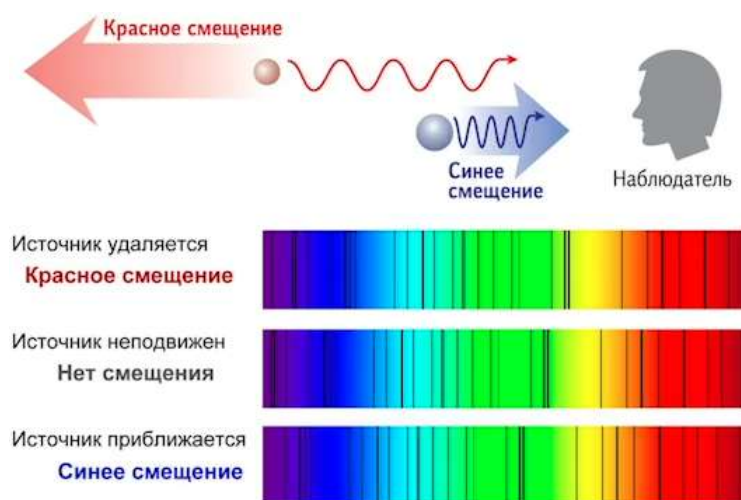


Рис. 8.22. Эффект Доплера

Благодаря такой точности, ученые получают информацию о звездах и об объектах, которые находятся рядом с ними. Так, планета вращаясь вокруг звезды вызывает колебания самой звезды. Например, Юпитер, летящий со скоростью 13 км/с, вызывает за счет притяжения движение Солнца со скоростью 13 м/с.

Орбитальное движение звёзд вызывает периодическое смещение линий в их спектрах. В спектре двойной звезды обычно доминируют линии более яркого светила. Эта информация помогает узнать с каким периодом и какой массы планета обращается вокруг звезды.

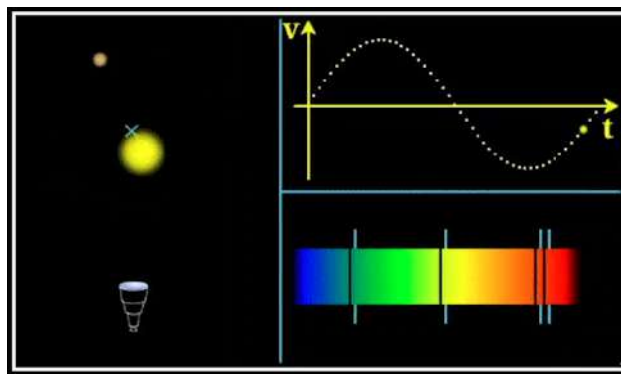


Рис. 8.23. Эффект Доплера. Линии в спектре звезды

На рисунке 8.24 показан спектр Солнца. Самые мощные спектрографы способны растянуть полосу спектра невероятно сильно (во многие метры). Специальным методом спектр разрезают на отдельные части и складывают их «стопкой» от голубого к красному цвету. На спектре видны отдельные линии поглощения – атомы прохладного газа поглощают отдельные фотоны света.

Изучая линии можно изучить даже структуру отдельной линии(рис. 8.25): ее распределение яркости или темноты.

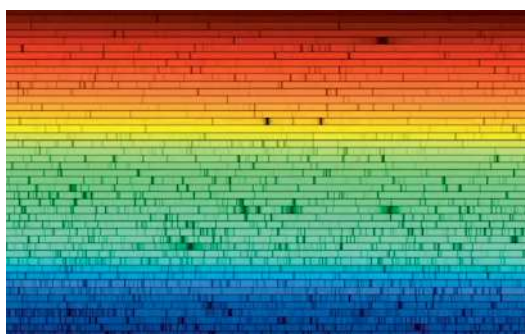


Рис. 8.24. Эффект Доплера

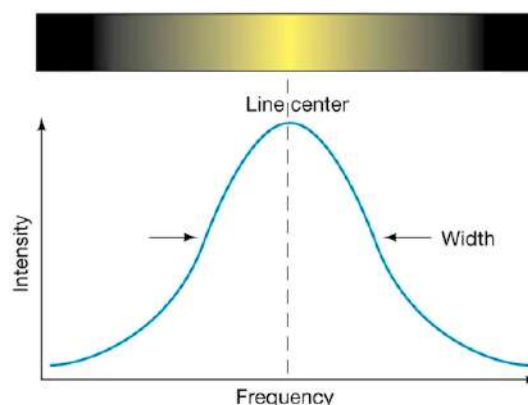


Рис. 8.25. Распределение яркости отдельной линии

Форма одной спектральной линии многое говорит о физическом составе. В атмосфере звезды атомы летают хаотически (рис. 8.16): те атомы, которые движутся в направлении к наблюдателю, приходят в голубом цвете линии излучения, а те атомы, которые движутся от наблюдателя, видны в красном цвете линии. В итоге форма линии излучения всех атомов приобретает колоколообразную (гауссообразную) форму. Чем шире линия, тем более интенсивно летают атомы. *Интенсивность хаотического движения атомов* – это температура (чем шире линия, тем выше температура газа).

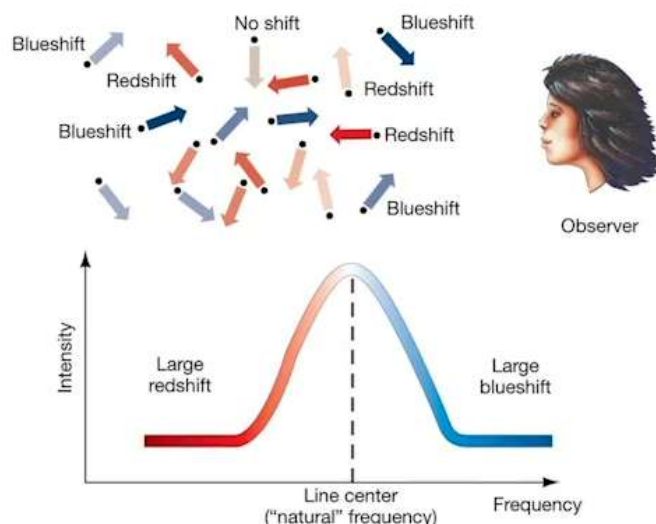


Рис. 8.16. Хаотическое движение атомов. Толщина спектральной линии

Таким образом, по толщине спектральных линий можно измерять температуру и не только. На рисунке 8.27 показано три спектра, полученных от разных звезд. Звезды имеют примерно одинаковую температуру (это заметно по виду спектра). Однако это звезды разного типа:

- Солнце;
- Белый карлик;
- Голубой гигант.

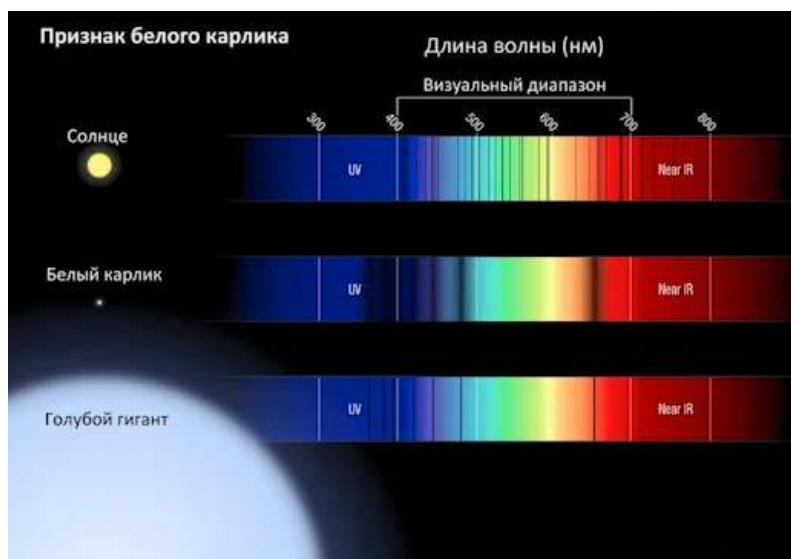


Рис. 8.27. Признак белого карлика

Спектры этих звезд выглядят по-разному. В Белом карлике вещество сжато до большой плотности, атомы тесно прижаты друг к другу. В атмосфере гигантской звезды атомы летают далеко друг от друга и не мешают излучать. Поэтому в спектре голубого гиганта линии очень тонкие – все атомы на одной и той же частоте излучения/

длины волны. В спектре же белого карлика – широкие линии, так как атомы по-разному друг друга возмущают в плотном веществе. Таким образом, по ширине линий можно судить о плотности вещества в атмосфере звезд.

Заключение

Спектральный анализ света позволяет изучать физические условия в атмосферах звезд. Но не только химический состав, температуру, плотность, но еще и магнитное поле, которое тоже оказывает влияние на внешний вид спектра. В физике существует так называемый *эффект Зеемана*, который позволяет измерять интенсивность магнитных полей в атмосферах звезд. Существуют еще такие тонкие методы, как измерение поляризации: измерение плоскости колебания электромагнитной волны. Изначально свет неполяризованный, но отражаясь от какой-либо поверхности, любой свет становится частично поляризованный.

Урок 9. Измерение пространства

Урок № 9 посвящен космическим объектам и тому, где они находятся. Для этого у астрономов есть специальные методы, чтобы измерять расстояние, направление на объекты, их движение в пространстве.

9.1. Методы измерения расстояний в астрономии

В астрономии измерение пространства – трудная задача. В быту расстояние измеряется с помощью линейки, рулетки, шагами, однако в космосе такой возможности нет (рис. 9.1., рис 9.2). Звезды сильно различаются по мощности излучения (светимости): иногда близкая звезда кажется не такой уж яркой, а далекая наоборот. Так, например, голубая звезда в левой части фотографии находится очень далеко. А красная звезда в центре фотографии (α Кентавра) – очень яркая, но не потому, что излучает мощный свет, а потому что близко находится.

Таким образом, видимый блеск звезды не дает надежного способа измерить расстояние. Так же как и с помощью линейки нельзя измерить расстояние в космосе.



Рис. 9.1. Область звездного неба



Рис. 9.2. Область звездного неба

Для измерения расстояний в пространстве Вселенной были придуманы косвенные методы. Самым надежным методом считается *радиолокация*.

Радиолокация.

Метод радиолокации на Земле применяется очень часто: сегодня во многих автомобилях есть локатор. Радиолокатор посылает к объекту сигнал – мощный импульс. Часть посланного сигнала, отразившись от объекта, возвращается через время t . Значит, расстояние равно

$$S = \frac{ct}{2},$$

где c – скорость света (около 300 000 км/с)

Например, расстояние до Луны около 400 000 км. Посланный туда сигнал чуть более чем за секунду добирается до Луны и через 2.5 секунды возвращается на приемник радиолокатора. Таким образом, 2.5 с – световое расстояние до Луны (луч

света достигает Луны и возвращается обратно), а расстояние до Луны примерно 1.5 световых секунды.

Метод радиолокации надежный, однако он плохо работает на больших расстояниях, так как сигнал, исходящий от передатчика частично рассеивается в пространстве по пути к объекту и на обратном пути. Астрономы научились принимать сигналы и от далеких планет: от Меркурия, Марса, Венеры и даже от планет гигантов.

Лазерная локация

Развитие метода радиолокации получило в области лазерной (световой) локации. В лазерной локации вместо радио волны посылается световая волна. Этот способ лучше, так как радиоволна – это длинноволновое колебание. Если колебание имеет длину 5 м, то расстояние до космического объекта нельзя измерить с точностью лучше, чем удвоенная длина волны. Т.е. длина волны определяет точность измерения. Свет имеет небольшую длину волны, но плохо отражается.

В начале 1970х годов на Луну летали пилотируемые экспедиции («Аполлон») и беспилотные аппараты.

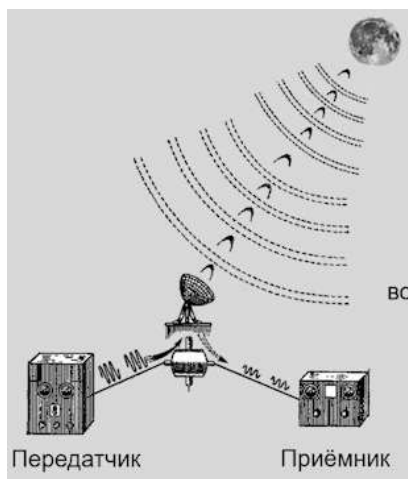


Рис. 9.3. Радиолокатор



Рис. 9.4. Экспедиция «Аполлон» (НАСА, 1969-1972 г)

На Луне устанавливались специальные (рис. 9.5) отражатели лазерного луча. Они устроены довольно просто. *Ретрорефлектор* – это набор стеклянных призм (рис. 9.6), обладающих полезным свойством: луч лазера, падающий на призму, отражается не как от зеркала, а в том же направлении, откуда он пришел. Такой лазерный отражатель полезен при лазерной локации. По длительности полета света (туда и обратно) измеряется расстояние до Луны. В настоящее время ошибка составляет меньше 1 см. Это позволяет и контролировать движение Луны, и контролировать движение материков на Земле, потому что телескопы стоят на материках – взаимное движение Луны и телескопов на материках контролируется измерением расстояния. Таким образом, астрономы могут контролировать теорию гравитации, теорию движения Луны вокруг Земли.

Такие рефлекторы еще не доставлены на поверхности других планет, например, на поверхность Марса. Однако в ближайшее время это будет сделано.

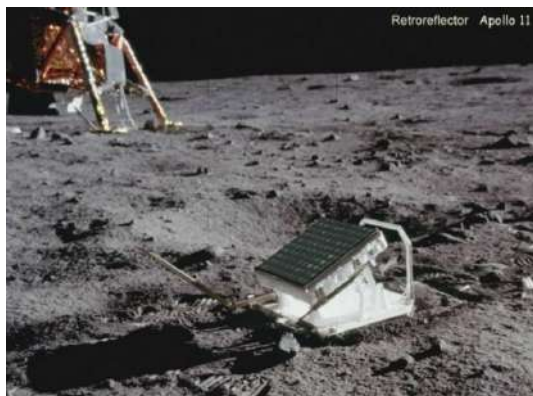


Рис. 9.5. Ретрорефлектор
(отражатель светового луча)



Рис. 9.6. Трехгранные призмы рефлектора

Локация работает только в пределах солнечной системы, но как тогда можно измерить расстояние до далеких звезд. В этом случае можно рассмотреть *принцип триангуляции*, которым пользуются географы и геодезисты.

Принцип триангуляции

У геодезистов есть специальный прибор – *теодолит*. Измерив базу и два угла, можно вычислить длину двух других сторон треугольника (теорема синусов). Этим пользуются геодезисты при составлении карт земной поверхности.



Рис. 9.7. Оптические методы измерения
расстояний

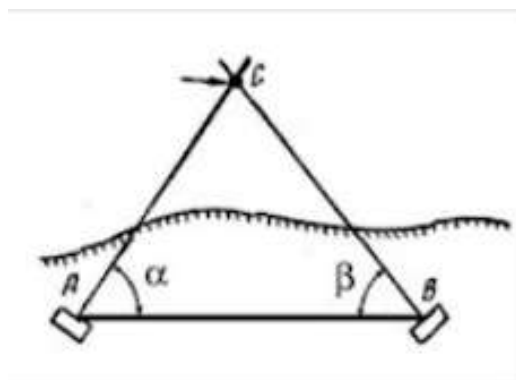


Рис. 9.8. Схема измерения углов

Суточный параллакс

Рассмотрим применение метода триангуляции на примере Луны.

В результате суточного вращения Земли наблюдатель перемещается и меняет направление своего взгляда на лунный шар (рис. 9.8).

Суточный параллакс – угол, под которым виден радиус Земли, проведенный в точку наблюдателя.

Горизонтальный параллакс – максимальное значение суточного параллакса, достигаемое, когда тело наблюдается у горизонта.

Стандартным считают горизонтальный экваториальный параллакс, опирающийся на экваториальный радиус Земли.



Рис. 9.7. Горизонтальный параллакс Луны. $\frac{3}{4}$ марта 2007. 20.02-3.30 UT

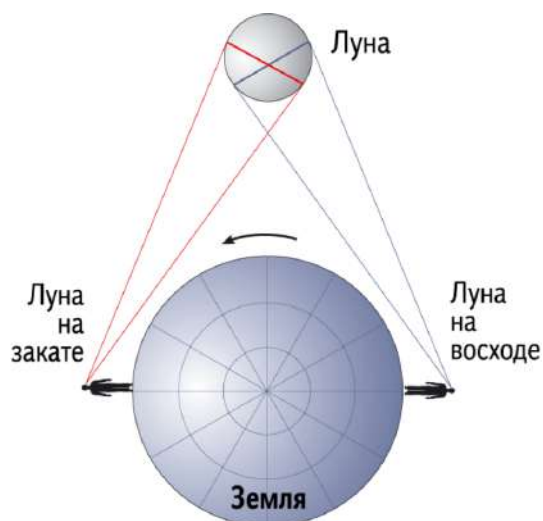


Рис. 9.8. Суточный параллакс

В качестве измерения расстояний до планет используется горизонтальный параллакс планеты (планета видна то у горизонта, то в направлении зенита). В случае горизонтального параллакса рассматривается угол, под которым от небесного светила виден радиус Земной орбиты.

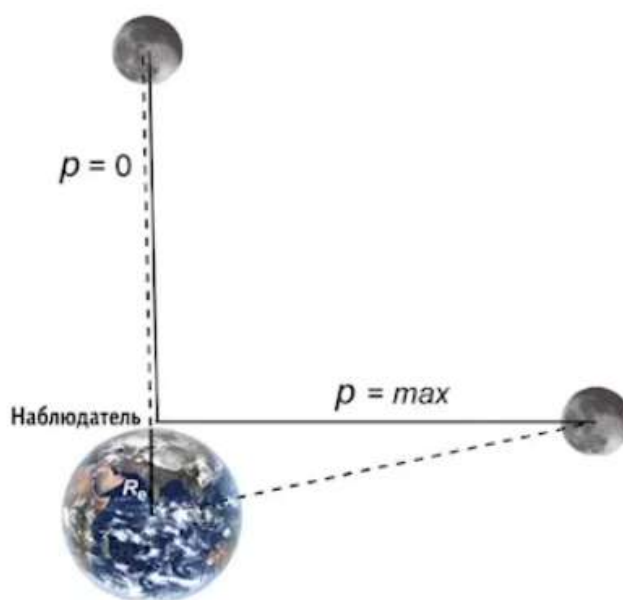


Рис. 9.9. Горизонтальный параллакс

Параллакс Венеры

Суточный параллакс помог измерить расстояние внутри Солнечной системы хотя бы до одной планеты. Измерение параллакса Венеры, проходящей на фоне Солнца, при наблюдении из разных пунктов на Земле (рис. 9.10). Время от времени для земных наблюдателей Венера проходит на фоне солнечного диска. В 18 веке разные астрономы в разных точках мира наблюдали прохождение Венеры на фоне солнечного диска, но через разные траектории. Длительность прохождения Венеры по солнечному диску позволяло измерить угловое расстояние. Расстояние до Венеры можно было вычислить зная угол и одну сторону и измерив еще два угла.



Рис. 9.10. Параллакс Венеры

Годичный параллакс.

Метод триангуляции работает и на гораздо больших расстояниях. В методе используется и размер земной орбиты – в течение полугода Земля перемещается из одной точки орбиты в другую. Расстояние от Солнца до Земли: 150 млн км, значит база равна 300 млн км.

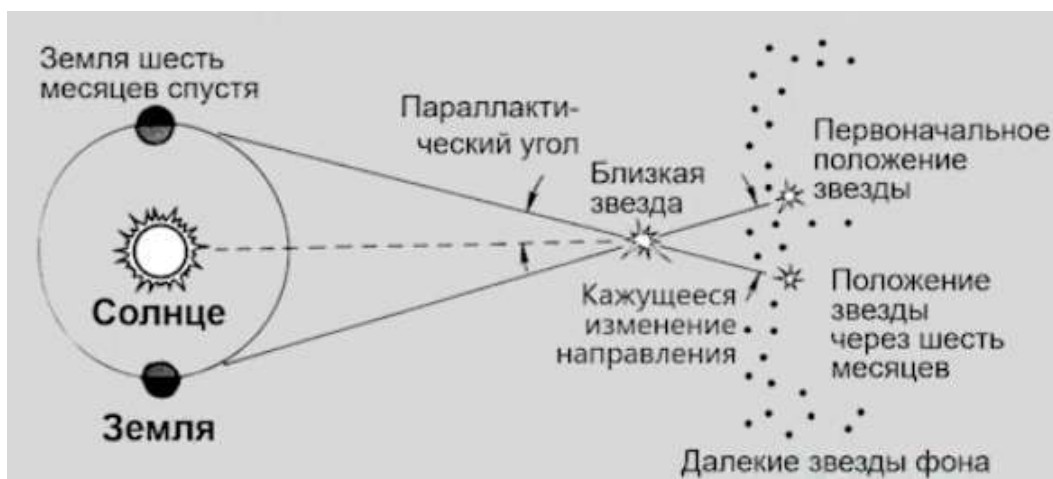


Рис. 9.11. Эффект параллактического смещения звезд

Параллакс ближайшей звезды (*Проксима* в созвездии Кентавра) равен 0,7 угловой секунды. До еще более далеких звезд еще меньшие параллактические углы. Тем не менее, астрономы умеют измерять такие малые углы. Под астрономической точностью всегда понимается точность измерения углом.

Комментарий: на практике измеряют не абсолютный, а относительный параллакс, определяя положение изучаемой звезды относительно далеких звезд фона.

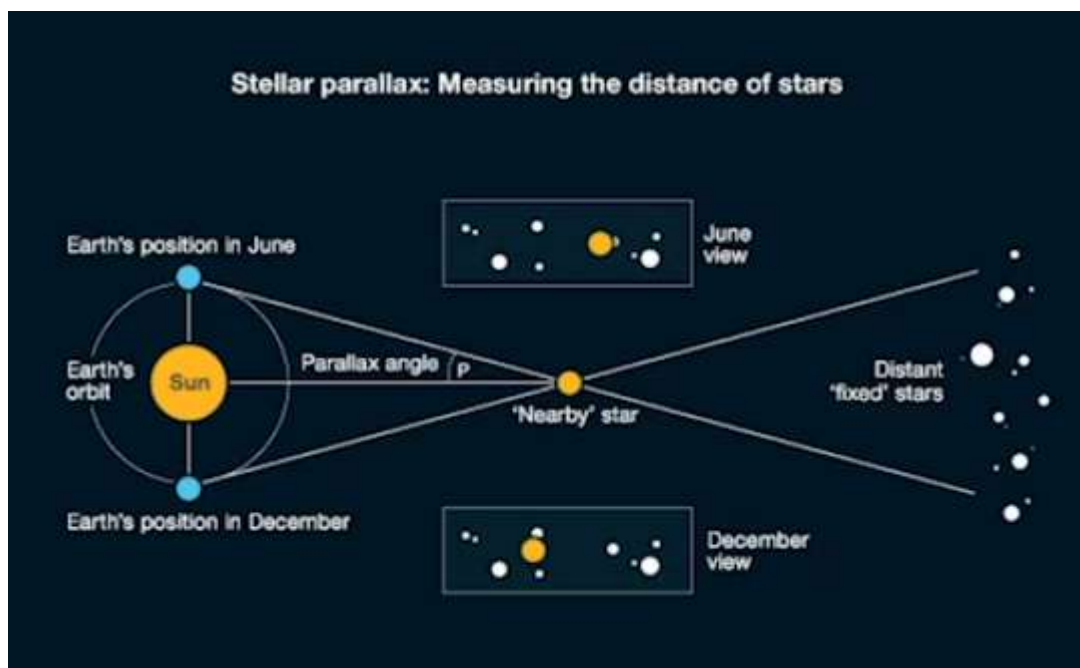


Рис. 9.12. Stellar parallax

Чем больше расстояние до объекта, тем меньше его параллактический угол (рис. 9.13).

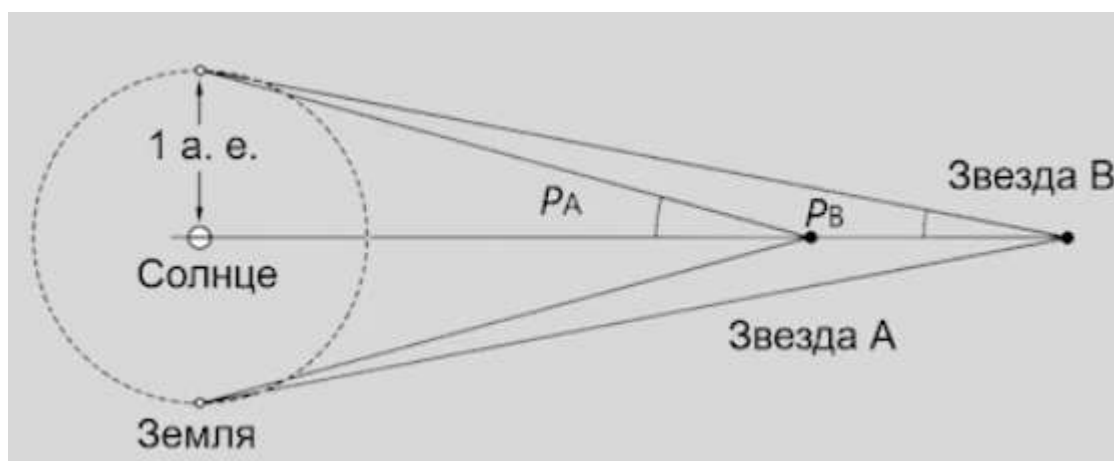


Рис. 9.13. Зависимость параллактического угла от расстояния

Угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты при условии, что направление на звезду перпендикулярно к радиусу, называется годичным параллаксом звезды. В формулах обозначается буквой p .

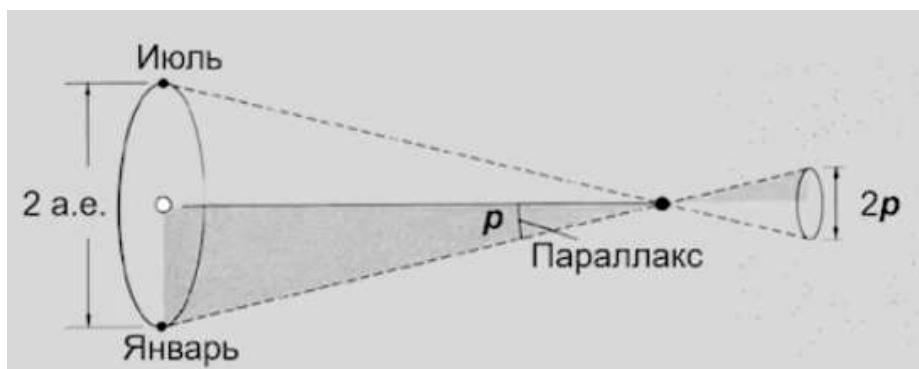


Рис. 9.14. Зависимость параллактического угла от расстояния

9.2. Единицы расстояния в астрономии

Астрономическая единица

Для Солнечной и других планетных систем, а также для двойных и кратных звезд, удобным масштабом служит радиус земной орбиты (1 а. е.) 1 а. е. = 149 597 870 км = 150 млн км.

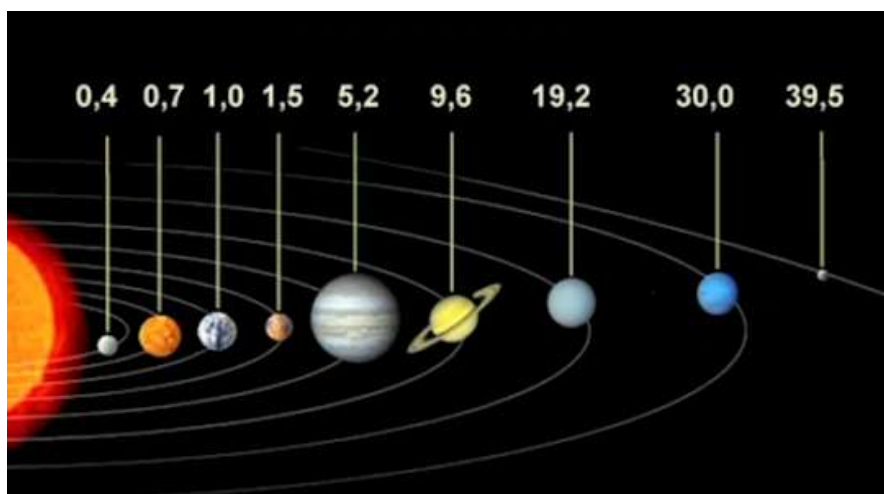


Рис. 9.15. Расстояние от планет до Солнца

Парсек

На основе годичного параллакса в астрономии определена внесистемная единица длины – парсек (параллакс + секунда).

Если R – радиус орбиты Земли, а D – расстояние до объекта, то

$$\operatorname{tg} p = \frac{R}{D}.$$

Но для малых углов, выраженных в радианах, с большой точностью $\operatorname{tg} p = p$. Поэтому астрономы всегда используют формулу

$$p = \frac{R}{D},$$

откуда

$$D = \frac{R}{p}.$$

Поскольку $R = 1$ а. е., а в одном радиане примерно $206\,265''$, то для p , выраженного в угловых секундах, получим

$$D = \frac{206\,265'' \text{ а. е.}}{p}.$$

Чтобы не писать длинные числа, астрономы определили новую единицу длины – парсек (пк):

$$1 \text{ ПК} = 206\,265 \text{ а. е.}$$

Тогда

$$D = \frac{1 \text{ ПК}}{p}.$$

Приблизительно: $1 \text{ ПК} = 3,26$ светового года.

Межзвездные расстояния

На самом деле в созвездиях звезды находятся не на одном расстоянии от Солнца, как кажется, а на разных расстояниях: одни звезды ближе, другие дальше.

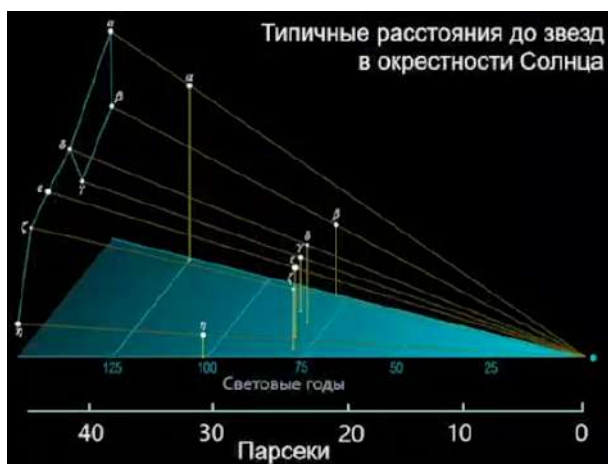


Рис. 9.16. Типичные расстояния до звезд в окрестности Солнца

Межгалактические расстояния

До далеких галактик метод параллакса практически не работает. Существует два метода: метод стандартной свечи и метод стандартной линейки. *Стандартная свеча* – применение любого астрономического объекта, свойства которого хорошо известны: по его видимой яркости можно судить о расстоянии.

Урок 10. Созвездия и координаты

Урок 10 посвящен теме того, как небесные объекты располагаются на небе и как измеряется их взаимное расположение. Для наблюдателя с Земли все объекты кажутся расположенными на сферическом экране. Однако это не так.

10.1. Ориентация на небесной сфере

Звезды объединены на небе в созвездия и астеризмы, которые многие годы позволяли еще нашим предкам ориентироваться по небу, понимать рисунок неба и его движение – это говорит о том, как движется Земля, сменяются сезоны года и др.



Рис. 10.1 Созвездия и астеризмы

На рисунке 10.2 показана область зимнего небосвода. Многим знакомо созвездие Ориона, Тельца и др. Такие россыпи звезд поначалу трудно было воспринимать и запоминать. Поэтому люди собирали звезды в отдельные «кучки» у себя в памяти, чтобы характерное их расположение помогало им запоминать звездный рисунок. Еще на древних картах находили художественные рисунки, которые соответствуют тем названиям, которые древние люди дали тем или иным созвездиям (рис. 10.3). После появления первых карт неба, на них стали изображать эти рисунки.



Рис. 10.2. Звёздное небо

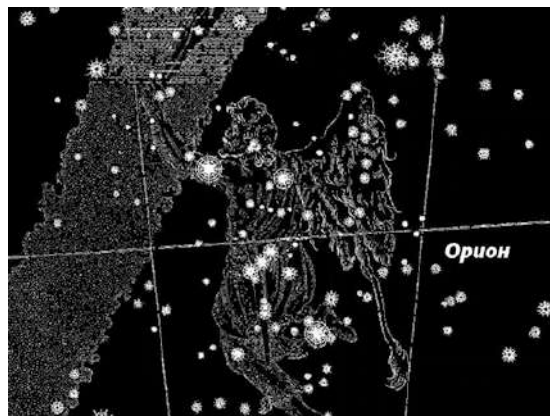


Рис. 10.3. Созвездие Орион

Как правило, в атласах звездного неба рисунок негативный: небо светлое, а звезды темные. Этому есть несколько причин: главная причина в том, что для типографа черный рисунок – очень затратный, так как практически весь бумажный лист необходимо закрасить краской, оставив лишь небольшое количество светлых пятен. К тому же на маленьких пятнах краска расплывается и заливает их. Поэтому более технологично оставлять фон светлым, а линии и звезды рисовать темными.

В 20 веке астрономы пользовались пластинками, где также получалось негативное изображение: в местах, куда падал свет, фотопластинка становилась черной.

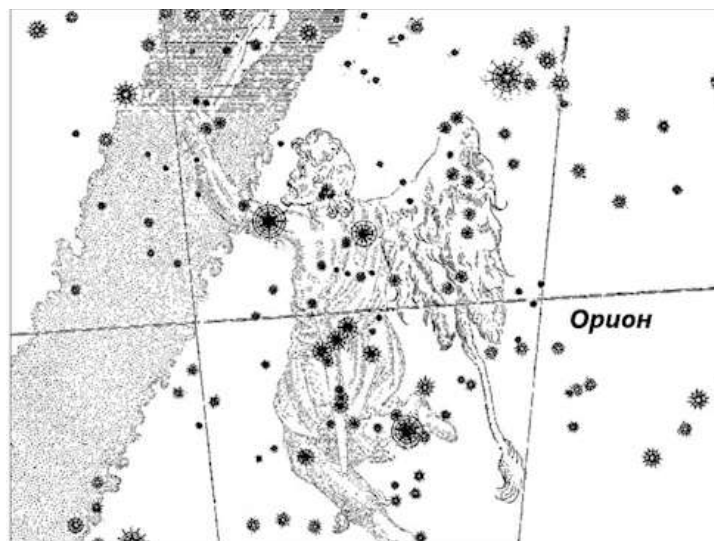


Рис. 10.4. Созвездие Орион в негативе

Астеризм – это группа ярких звезд, которые объединены общей легендой/рисунком (рис. 10.5). В современной астрономии словом созвездие называют целую площадку на небе, которую занимает та или иная группа звезд (рис. 10.6): одни звезды ближе, другие дальше – все это складывается в определенные проекции на небо и видны границы этой площадки.



Рис. 10.5. Астеризм

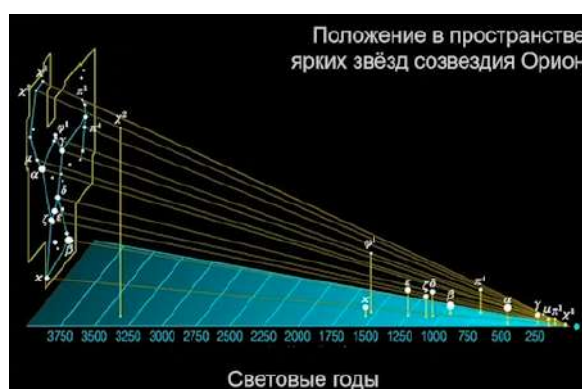


Рис. 10.6. Положение в пространстве ярких звезд созвездия Орион

В 20 веке астрономы провели точные границы площадок, и, например, на рисунке 10.7 показана площадка созвездия Орион в центре изображения. В случае Ориона – астеризм занимает практически всю площадку созвездия. А, например, на площадке Большой Медведицы созвездие – большое, а «Ковш» – маленький астеризм. Существуют и очень миниатюрные астеризмы, как, например, астеризм созвездия Телец.

Вся небесная сфера (рис. 10.8) разбита на 88 созвездий. Это было сделано примерно в 1930 году. На современном небе уже не существует пустых мест, куда можно было бы добавить созвездия. Однако площадок не 88, а 89. Дело в том, что астрономам хотелось сохранить традицию, связанную с созвездиями «Змееносец» и «Змея». Так как Змееносец в одной руке держит голову змеи, а в другой – ее хвост, то созвездие «Змея» имеет две площадки.

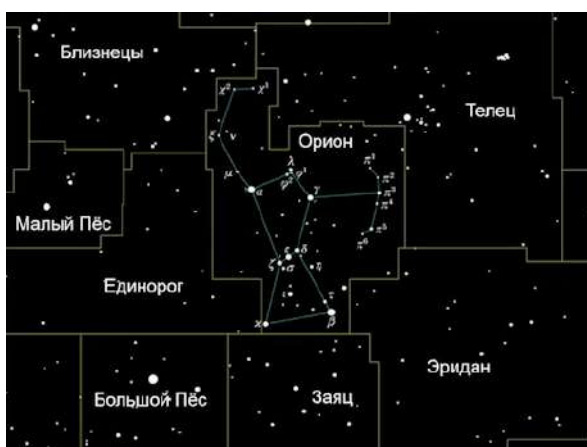


Рис. 10.7. Площадки созвездий

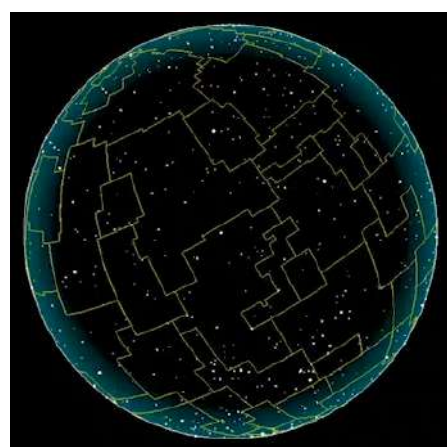


Рис. 10.8. Площадки созвездий на небосводе

На переднем плане рисунка 10.9 видно созвездие «Большой медведицы» и ее астеризм «Ковш».

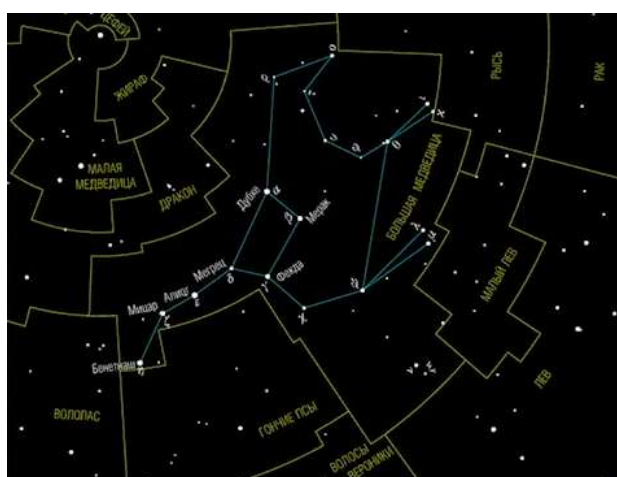


Рис. 10.9. Созвездия и астеризмы

Астеризм «Большая медведица» — это семь ярких звезд, которые легко заметить даже в городе. В прошлом взаимное расположение этих звезд было иное.

Для определения адреса каждой конкретной звезды используют обозначения и имена звезд. В конце 16 века ученый Иоганн Байер ярким звездам были приписаны обозначения буквами греческого алфавита (рис. 10.10). В случае «Ковша» Большой медведицы – звезды отмечены по порядку – геометрически, но в остальных созвездиях, наиболее яркую звезду всегда отмечают буквой α , вторую по яркости β и так далее. Когда не хватало греческих букв для обозначения, Байер использовал буквы латинского алфавита. Астрономы более поздних эпох стали нумеровать звезды цифрами, если не хватало букв двух алфавитов. Поэтому на подробных картах в обозначениях можно увидеть и греческие, и латинские буквы, и номера, обозначающие звезды.

У некоторых звезд свои личные имена (рис. 10.11), которые им дали древние наблюдатели. Греческие, римские и арабские астрономы называли звезды своими именами.

В Средневековье сильное развитие астрономия получила в арабских странах, на Аравийском полуострове.

В настоящее время астрономам удалось выяснить около 200 исторических имен ярких звезд – больше в истории не найдено. Большинство названий звезд просто написано в каталогах, и астрономы из не запоминают.

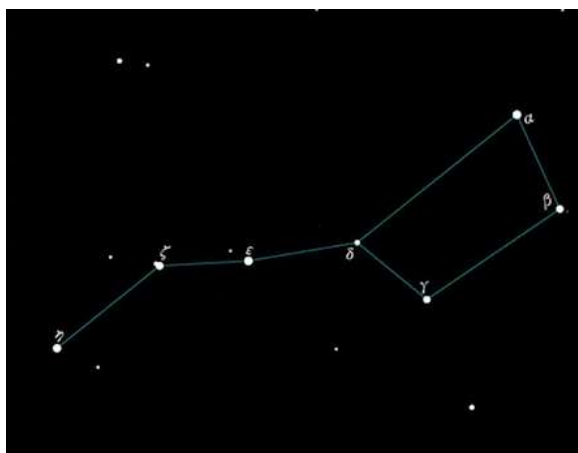


Рис. 10.10. Обозначение звезд

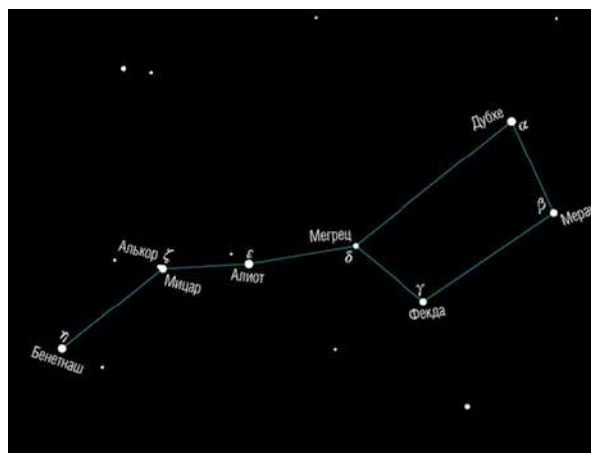


Рис. 10.11. Имена звёзд

Собственное движение звезд

Конфигурация звезд хоть и медленно, но меняется. На рисунках 10.12 и 10.13 показано, каким «Ковш» Большой медведицы был 100 000 лет назад и каким он будет через 100 000 лет. Астрономы, замечая куда движутся звезды прогнозировали, как будет выглядеть «Ковш».

Как правило, звезды одного созвездия не связаны никакой родственной/генетической связью и являются случайной проекцией близких и далеких светил. Однако, есть исключения.

В качестве примера возьмем «Ковш» Большой медведицы. На рисунке 10.14 видно, что центральные звезды находятся практически на одном расстоянии от Земли, а две крайних на гораздо большем расстоянии. Причем пять центральных звезд практически одинаково движутся в пространстве – летят с одной и той же скоростью и в одном и том же направлении. Если вновь вернуться к рисункам 10.12 и 10.13 можно заметить, что при движении звезд их краевое положение изменилось, а центральные звезды практически не поменяли своего положения друг относительно друга. Дело в том, что эти звезды являются родственниками – генетически связанными светилами: когда-то они образовались в одном месте нашей Галактики, в одном плотном газовом облаке. Облако рассеялось, а звезды продолжили свое взаимное движение. Астрономы и ученые измеряли их химический состав и возраст и убедились, что звезды были сформированы в одно время.

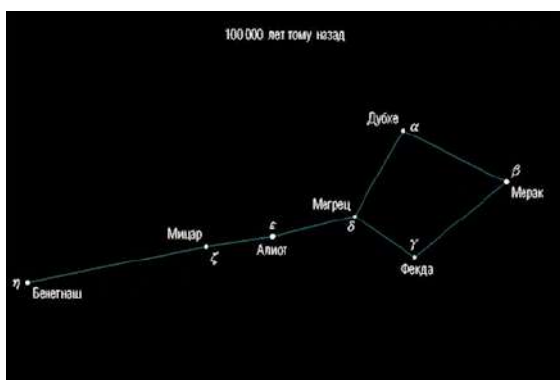


Рис. 10.12. «Ковш» Большой медведицы
100 000 лет назад

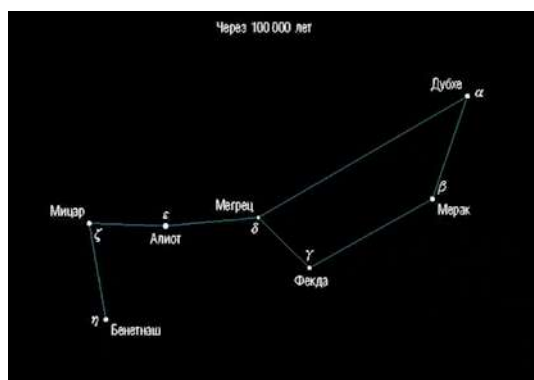


Рис. 10.13. «Ковш» Большой медведицы
через 100 000 лет

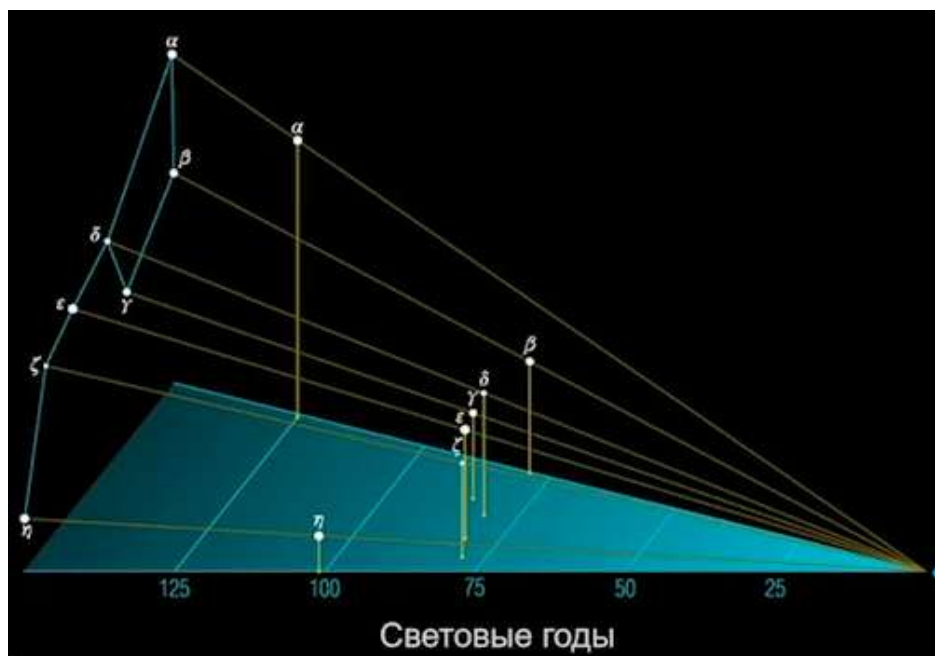


Рис. 10.14. Генетически связанные звезды в астеризме «Ковш» Большой медведицы

10.2. Точное положение объектов на небесной сфере

В прошлые века ученые и астрономы ориентировались на звездном небе по созвездия и астеризмам. В настоящее время астрономы более точно определяют положение звезд. Для этого была введена система координат.

Астрономы пользуются двумерной системой координат (рис. 10.15): две взаимно перпендикулярных оси; положение любой точки определяется двумя числами. Бывают не только *декартовы системы*. Положение точки можно определять ее расстоянием от начала системы координат и углом. Такой луч до точки называют *вектором*. Такая система координат называется *полярной системой*. Астрономами чаще используются полярные системы координат.

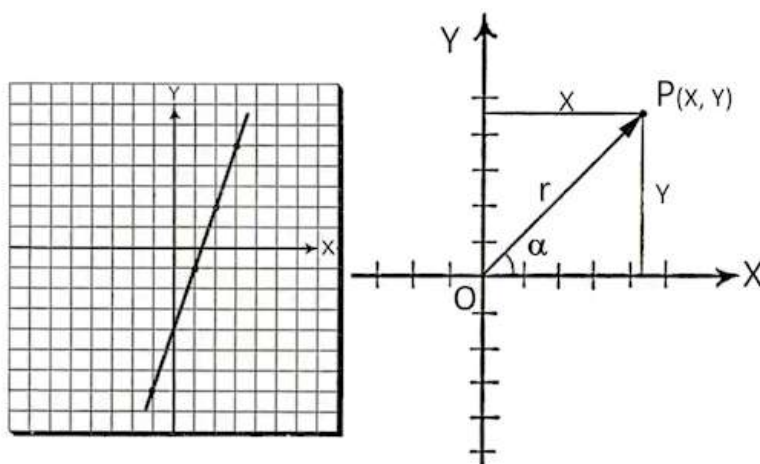


Рис. 10.15. Координаты в 2-мерном пространстве

В трехмерном пространстве астрономы могут пользоваться либо декартовой системой, либо полярной системой координат. Положение точки можно определить либо проекциями на три взаимно перпендикулярные оси, либо расстоянием до этой точки от начала координат и ориентацией этого отрезка, которая задается двумя углами.

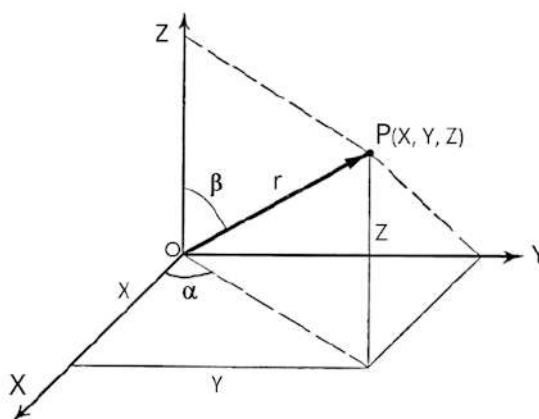


Рис. 10.16. Координаты в 3-мерном пространстве

Полярные системы в астрономии более применимы, потому что, как правило, легко измерить направление на объект, а расстояние до космического объекта – сложнее.

Астрономы, измеряя направления на объект небесной сферы, взяли пример в географов. Географы ввели такую систему координат, которая, собственно, и является полярной. Ось вращения Земли используется как опора для этой географической системы координат: один угол – угловое расстояние от экватора (*географическая широта*) до того места, расстояние до которого определяется, второй угол – это расстояние вдоль экватора – *географическая долгота*. С конца 19 века долгота измеряется от Гринвича (начальный пункт).

Наблюдая небесные светила, мы можем представить себя в центре «небесной сферы», на поверхности которой для указания положения объекта можно использовать сферическую систему координат.

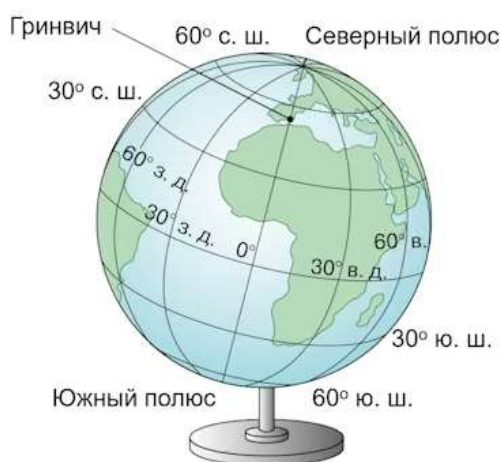


Рис. 10.17. Координаты на сфере

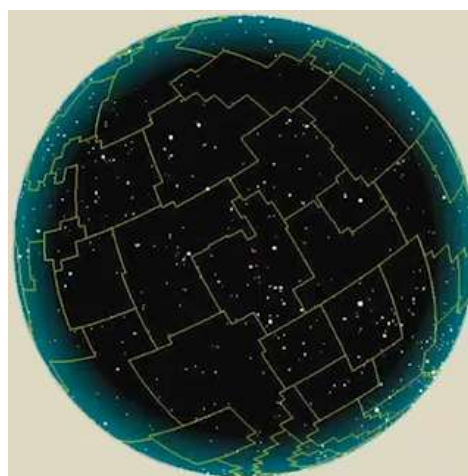


Рис. 10.18. Небесная сфера

Горизонтальные координаты

У астрономов несколько систем полярных координат. Первая система – самая простая – горизонтальная. Основная ее плоскость – плоскость горизонта в точке наблюдения. Сила тяжести Земли обеспечивает направление в *зенит* и в противоположную точку – *надир*. Необходимо провести горизонтальную поверхность, перпендикулярную отвесной линии.

- A – азимут ($0^\circ / 360^\circ$).
- h – высота ($+90^\circ / -90^\circ$).

Угол от горизонта до светила – это высота.

Астрономы отсчитывают азимут от точки юга, а географы и геодезисты – от точки севера. Впрочем, иногда от так же поступают и астрономы. Таким образом, астрономические и геодезические азимуты отличаются друг от друга на 180 градусов.

В последних работах, астрономы решили отказаться от традиции отсчитывать азимут от точки юга и тоже стали отсчитывать от точки севера.

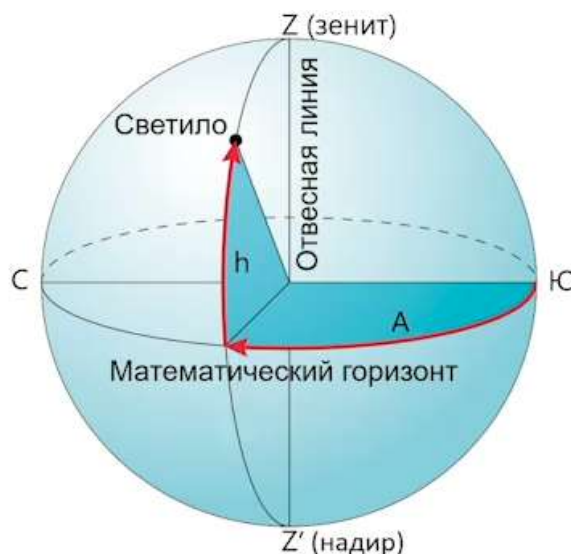


Рис. 10.19. Горизонтальная система координат

Звездное небо

Известно, что земной шар совершает суточное вращение вокруг своей оси. В это же время, жителям нашей планеты кажется, что это звездное небо вращается вокруг нас. На рисунке 10.21 показана плоскость математического горизонта для наблюдателя, которые находится в средних широтах.

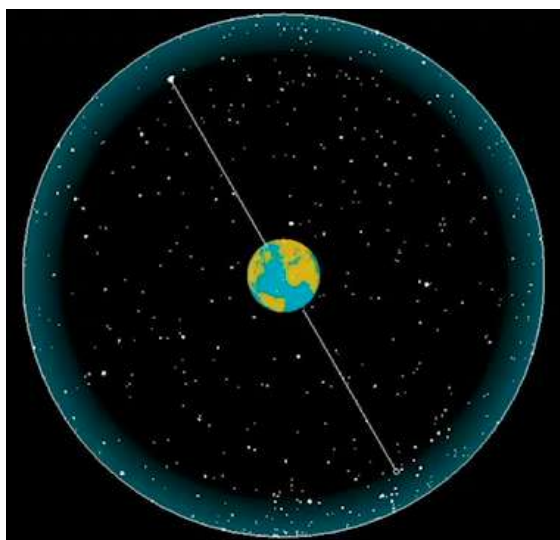


Рис. 10.20. Вращение Земли

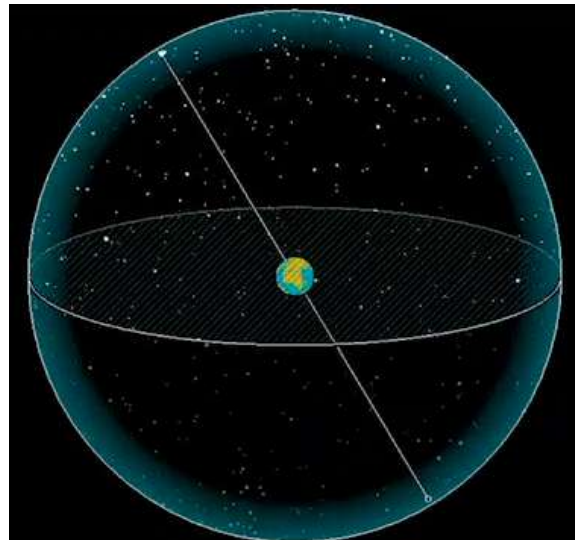


Рис. 10.21. Вращение Земли

Экваториальные координаты

Горизонтальная система координат плоха тем, что небесное светило не остается подвижным в этой системе, поэтому постоянно меняется их азимут и высота. Это

неудобно, так как координаты все время меняются, а астрономам хотелось бы иметь постоянную систему координат.

Таким образом, можно ввести новую систему координат, связанную с вращением Земли. Аналогично тому, как сетка географических координат связана с поверхностью Земли, были введены такие же координаты на небе: пусть мнимая ось – опора для системы координат, а вращение Земли будет изменять положение всей сетки координат на небе. Ее реализовали в виде экваториальной системы небесных координат.



Рис. 10.22. Экваториальные координаты

Плоскость земной орбиты (эклиптика) не совпадает с плоскостью экватора Земли.

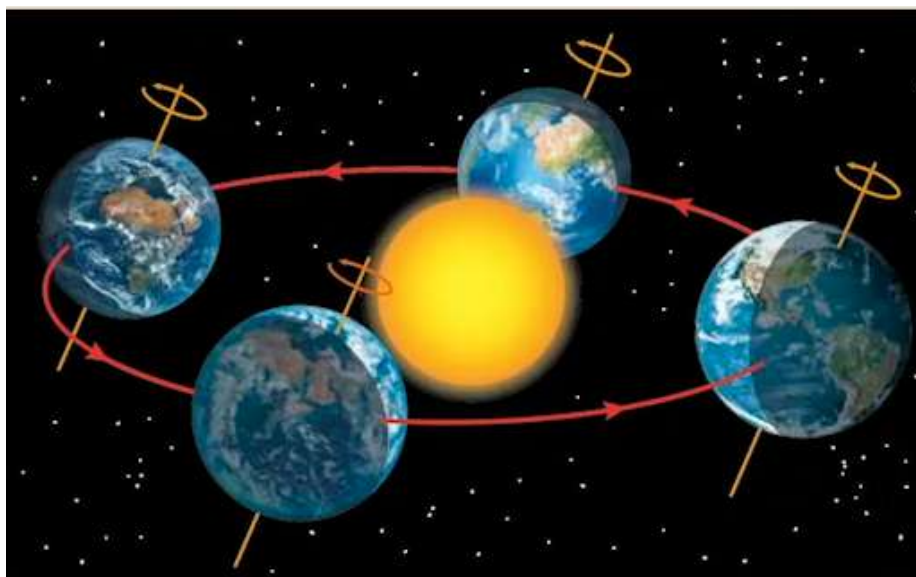


Рис. 10.23. Положение Земли в пространстве

Плоскость орбиты Земли и плоскость экватора Земли наклонены друг к другу на угол примерно 23 градуса (рис. 10.24), что обеспечивает смену сезонов года. Этот наклон Земной оси привел к тому, что на экваторе появилась точка пересечения земной орбиты (эклиптики) и экватора. Таких точек две. Нижнюю точку приняли за начало отсчета угла экватора.

На Земле – широта и долгота, а на небесной сфере – это прямое восхождение и склонение. Два угла позволяют точно зафиксировать положение светила.



Рис. 10.24. Взаимный наклон плоскости орбиты Земли и плоскости экватора

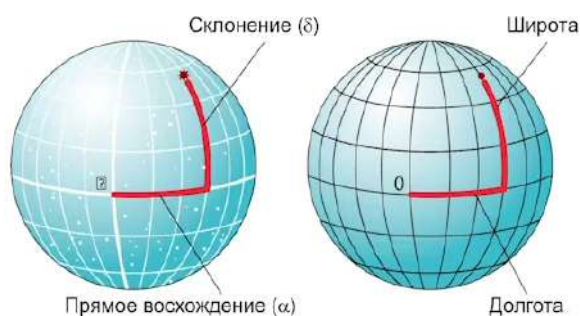


Рис. 10.25. Экваториальные координаты

Обычно угол от экватора в сторону полюса определяют с положительным знаком, и с отрицательным знаком в сторону южного полюса.

Вдоль небесного экватора прямое восхождение в астрономической практике обычно не в градусах, а в часах/минутах/секундах угла (360 градусов = 24 часа).



Рис. 10.26. Экваториальные координаты

Урок 11. Измерение времени

Пространства от времени в отдельности не существует – это единая сущность (по общей теории относительности Эйнштейна). Однако методы измерения времени и пространства – разные.

Существует очень много систем измерения времени.

11.1. Измерение времени – небесные объекты

В те времена, когда человек был еще диким и не имел технических средств, время уже руководило его жизнью (рис. 11.1): утром просыпались, вечером засыпали – Солнце было главным механизмом измерения времени. В полдень Солнце находилось выше всего на небосводе, а ночью его совсем не было. Когда человек стал разумным и начал путешествовать, ему понадобилось измерять пространство и время.

Для тех, кто живет в жарких странах смена фаз Луны определяет многие жизненные и экономические циклы (рис. 11.2): так как днём стоит слишком высокая температура и невозможно ни передвигаться, ни делать что-либо. Арабские народы привыкли к тому, что жизнь начинается с заходом Солнца, и появлением Луны.



Рис. 11.1. Человек в древние времена



Рис. 11.2. Смена фаз Луны

Существует три природных периода, которые руководят нашей жизнью:

- *Год* – оборот Земли вокруг Солнца (около 365,25 суток).
- *Месяц* – период смены лунных фаз (около 29,5 суток). Не равен периоду обращения Луны (27,3 суток).
- *Сутки* – период вращения Земли относительно Солнца.

Солнечные часы.

На рисунке 11.4 показано, какую траекторию движения имеет Солнце в разные периоды года: летом Солнце рано восходит и поздно заходит, осенью и весной Солнце восходит не очень рано и заходит не очень поздно – эти периоды называются *равноденствием*, а зимой Солнце поздно восходит, невысоко поднимается над горизонтом на юго-востоке и быстро опускается на юго-западе. С этим связана низкая температура в зимний период.

Движение Солнца было первым механизмом измерения времени. Для того, чтобы измерять время используя Солнце придумали примитивные приборы – солнечные часы.



Рис. 11.3. Три природных цикла

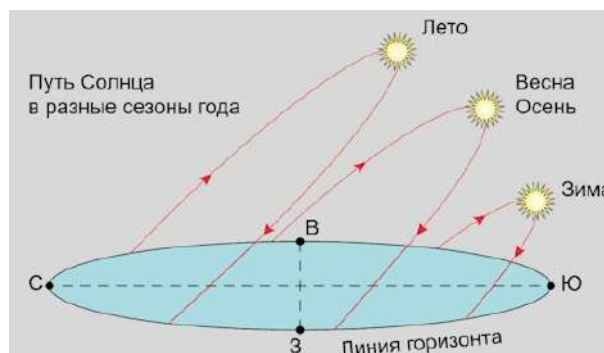


Рис. 11.4. Солнечные часы

На рисунках 11.5 и 11.6 показаны первые солнечные часы. *Гномон* – специальная палочка, которую люди втыкали, чтобы по поведению/движению ее тени оценивать время. С ее появлением были сделаны специальные механизмы под названием солнечные часы, в которых обязательно должен был быть аналог гномона, который отбрасывает тень на циферблат. Экваториальные часы удобны тем, что плоскость циферблата параллельна земному экватору. Солнце в течение суток движется в этой плоскости, а значит и движение тени гномона происходит равномерно.

Однако такие экваториальные часы хорошо работают в летний период. В зимний период Солнце оказывается ниже плоскости экватора, тень не отбрасывается на циферблат.

На рисунке 11.6 показаны экваториальные часы с двусторонним гномоном, созданные древними китайскими учеными: по нижнему циферблату можно было узнать время зимой, а по верхнему циферблату – летнее время.

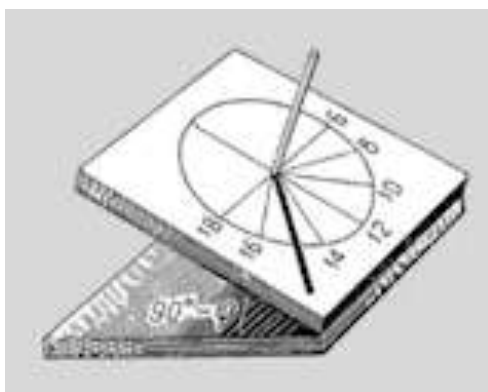


Рис. 11.5. Экваториальные солнечные часы



Рис. 11.6. Экваториальные часы с двусторонним гномоном

На рисунке 11.7 показано, что не всегда можно делать экваториальный циферблат, а еще и горизонтальный. В горизонтальных солнечных часах тень от

гномона (в данном случае от треугольника) тень будет двигаться неравномерно, потому что Солнце перемещается в другой плоскости – промежутки времени, равные одному часу, будут иметь разные размер на циферблате, что не очень удобно.

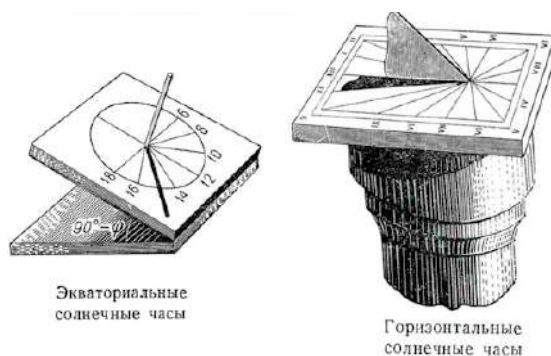


Рис. 11.7. Экваториальные и горизонтальные солнечные часы

На рисунке 11.8 показаны еще одни горизонтальные солнечные часы, изящно устроенные. В нижней части часов написаны географические координаты того места, где они установлены.

Преподаватель дает задачу для слушателей: зная координаты места, определить, под каким углом расположен гномон. Проверить решение можно будет примерно измерив на фотографии угол транспортиром.

Довольно часто, путешествуя по древним городам, можно увидеть часы на стенах (рис. 11.9) старых зданий. Гномон так же расположен над плоскостью циферблата, но сама плоскость вертикальная. Гномон направлен на ту ось, вокруг которого вращается Солнце на горизонте. Неоднородность и неравномерность движение тени по циферблату в таких солнечных часах – велика. Она связана с тем, что само Солнце движется на небосводе неравномерно. Причин несколько: во-первых, орбита Земли не круговая, а немного эллиптическая; во-вторых, плоскость, в которой вращается Земля (плоскость экватора), и плоскость Земной орбиты не совпадают на 23 градуса. Именно поэтому рядом с такими вертикальными часами должна обязательно висеть таблица поправок.



Рис. 11.8. Горизонтальные солнечные часы

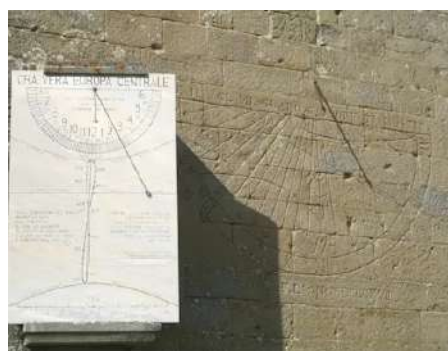


Рис. 11.9. Вертикальные часы и график поправок (аналемма)

Аналемма – таблица поправок, таблица уравнения времени, которая по показаниям солнечного времени помогает вычислить точное время, как если бы тень двигалась равномерно.

Часовые пояса и зоны

Люди в разных частях земного шара пользуются разным временем. В ту эпоху, когда не было средств связи, люди ориентировались по солнечному времени.

С появлением в XIX в. быстрого железнодорожного транспорта жить по местному солнечному времени оказалось неудобно. Решено было внутри границ каждого часового пояса (ныне – зоны) местное время считать одинаковым. Время в разных зонах различается только на целые часы. Таким образом, пересекая границу часовой зоны, необходимо перевести стрелки на нужное количество часов: на один час вперед, если Вы движетесь на восток, или на один час назад, если Вы движетесь на запад.



Рис. 11.10. Часовые пояса и зоны мира

Оказалось, что такая система тоже не очень удобна: если небольшая страна входит в зону двух часовых поясов, то есть ли смысл переводить людям время. Поэтому каждая небольшая страна хочет иметь единое время. Поэтому позже границы часовых поясов прошли с ориентировкой на административные границы государств. Но, например, СССР (ныне Россия и другие страны) – был протяженным по долготе государством, поэтому его пришлось разбить на несколько часовых поясов. При этом все же разбиение на зоны проходило с учетом административных границ, чтобы та или иная республика или область внутри имели одинаковое время.

Звездное небо как часы

Земля вращается вокруг оси в одну сторону, небосвод нам кажется вращающимся в другую сторону. Вращение Земли является надежными астрономическими часами, которыми пользовались многие века. Для многих людей циферблатом служит область

вокруг полярной звезды – вокруг Северного полюса мира, как говорят астрономы – та точка, в которую направлена ось вращения Земли. Поэтому по положению «Ковша» Большой медведицы довольно точно можно говорить о ночном времени.

К сожалению, в южном полушарии Земли таких удобных часов нет (рис. 11.12) – область не отмечена яркой звездой. Однако по положению окрестных созвездий можно довольно точно определить, какой период ночного времени в данный момент происходит.



Рис. 11.11. Звездные часы. Полярная звезда



Рис. 11.12. Звездные часы в южном полушарии

Солнечное и звездное время.

Солнце на небосводе движется не только за счет суточного вращения Земли, но и за счет орбитального обращения Земли вокруг Солнца. В один и тот же час суток люди видят Солнце в проекции на разные области неба. Днем редко можно увидеть положение Солнца на фоне звездного неба. В момент полного Солнечного затмения на небе видны и Солнце, и звезды. Астрономам не трудно вычислить, на фоне каких созвездий в данный момент видно Солнце.

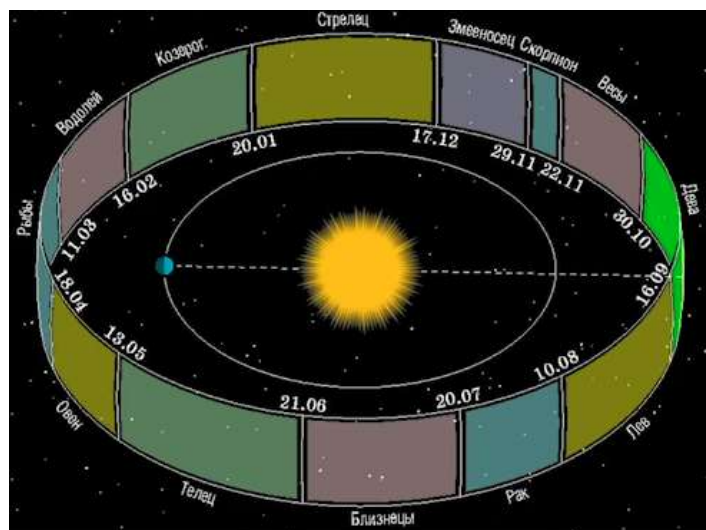


Рис. 11.13. Солнечное и звездное время

Вследствие движения Земли по орбите солнечные сутки длиннее звёздных приблизительно на 3 минуты 56 секунд. За сутки Земля проходит по орбите примерно 1 градус. Звёздные сутки (т. е. период вращения Земли) равны $23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04^{\text{s}}$ среднего солнечного времени. Таким образом, солнечные сутки оказываются длиннее звездных суток.

Сидерический месяц – 27,3 суток – истинный период обращения Луны вокруг Земли по орбите. За месяц Земля смещается по орбите и Луне приходится еще немного довернуть, чтобы восстановилось относительное положение Земли, Луны и Солнца.

Синодический месяц – 29,5 суток – смена видимого изображения Луны (фаза/доля, освещенная Солнцем) продолжается дольше.

Латинское *sidus* – звезда, др.-греческое *synodos* – соединение, сближение.

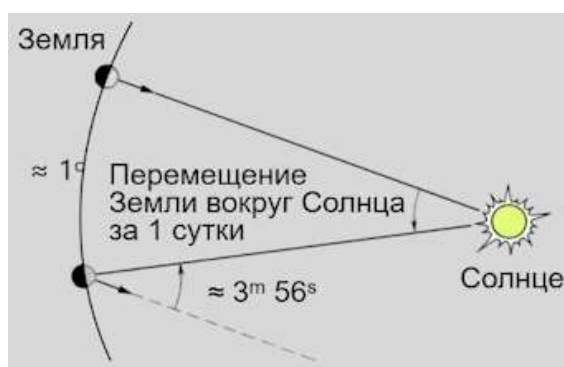


Рис. 11.14. Перемещение Земли вокруг Солнца



Рис. 11.15. Смена лунных фаз

11.2. Измерение времени: часовые механизмы

В современном мире в быту небесные светила играют не такую большую роль, как прежде, потому что человек изобрел механизмы измерения времени – часы.

Часовые механизмы.

Первыми механическими часами, изготовленные человеком были песочные и водяные часы, имеющие один и тот же принцип. Песочные часы измеряют фиксированные отрезки времени. Песочные часы употребляются до сих пор. Водяные часы (клепсидра), в принципе, подобны песочным часам, но давно вышли из употребления.

В тот момент, когда точность измерения времени перестала удовлетворять ученых – стали изобретать механические часы. Поэтому изобретение маятниковых часов стало очень важным открытием (рис. 11.16). До сих пор люди используют маятник, как механизм, отсчитывающий равные промежутки времени.

Период колебаний маятника не зависит от амплитуды колебаний, если она мала

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

T – период колебаний маятника;
 L – длина подвеса маятника;
 g – ускорение свободного падения.

Однако, часовой механизм должен обеспечивать длинную работу. Колебания маятника же постепенно затухают, и он останавливается. Важным изобретением был анкерный механизм. Он поддерживает колебания маятника, который стабилизирует ход часов.



Рис. 11.16. Маятник

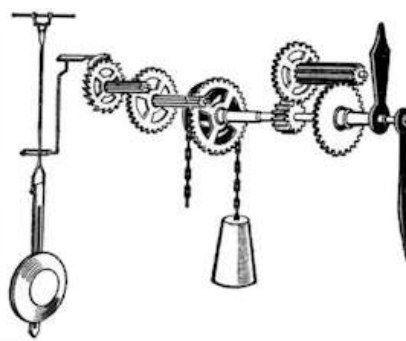


Рис. 11.17. Анкерный механизм

Существуют и более сложные анкерные механизмы. Один из них показан на рисунке 11.18.

Часы с подвешенным маятником могут работать в том случае, если их держат на стене или на столе и не передвигают. А людям были необходимы часы, которые можно было бы носить с собой. Поэтому были придуманы другие часы (рис. 11.19), где колебания маятника не зависят от силы тяжести и от движения подвеса (крутильные колебания маятника). Механически такие часы имеют тонкую пружинку и колесико на оси: пружина позволяет колесу делать пол-оборота в разные стороны (совершать крутильные колебания) при поддержке анкерного механизма, который обеспечивает приток энергии для колебаний.

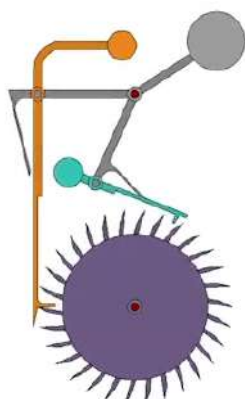


Рис. 11.18. Сложный анкерный механизм



Рис. 11.19. Балансированный механизм часов

Механические часы были доведены до совершенства в первой половине 19 века. Тогда морские путешествия были очень распространены и необходимо было обеспечить точность в измерении долготы. Географическая широта измеряется просто – ночью можно увидеть, на какой высоте над горизонтом находится полярная звезда и примерно измеряете широту. Если Вы находитесь на Северном полюсе, то полярная звезда находится в зените, а если на экваторе, то полярная звезда находится на горизонте.

Морской хронометр позволил точно измерять географическую долготу для составления надёжных географических карт и уверенной навигации. Вычисление долготы производится следующим образом: записывается час отплытия из порта, в течение 24 часов Земля делает оборот – на сколько часов задерживается/опережает восход Солнца по сравнению с портом, на столько часов по долготу Вы переместились на восток или на запад. Морской хронометр считается самыми точными механическими часами, которые можно переносить без потери точности: специальный карданный подвес позволяет коробочке часов колебаться, а часовый механизм не испытывает колебаний.



Рис. 11.20. Карта мира



Рис. 11.21. Морской хронометр

Электронные кварцевые часы

В середине 20 века появились электронные часы. Немного неверно их называть полностью электронными. Такие часы скорее механические, но с использованием электрических схем.

Кристалл кварца под действием пьезоэлектрического эффекта совершает быстрые изгибные колебания на собственной резонансной частоте, стабилизируя работу электронной схемы.

В настоящее время, кварцевые часы – самый распространенный механизм измерения времени: в каждом электронном устройстве обязательно есть кварцевые часы, которые задают темп работы процессора.

Атомные часы

Во второй половине 20 века получила развитие новая часовая технология – *атомная*.

Год от года уменьшалась ошибка измерения времени с помощью атомных часов. В настоящее время точность атомных часов достигла невероятных значений. Самые точные атомные часы ошибутся на 1 сек за 13 млрд лет, т. е. за время жизни Вселенной.

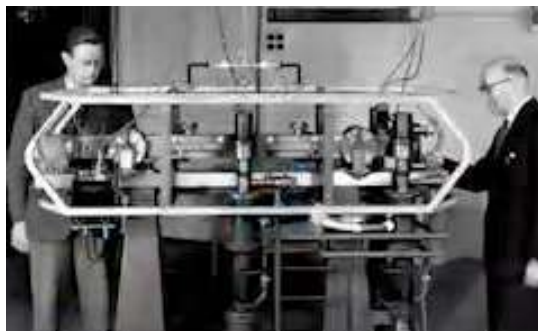


Рис. 11.20. Атомные часы

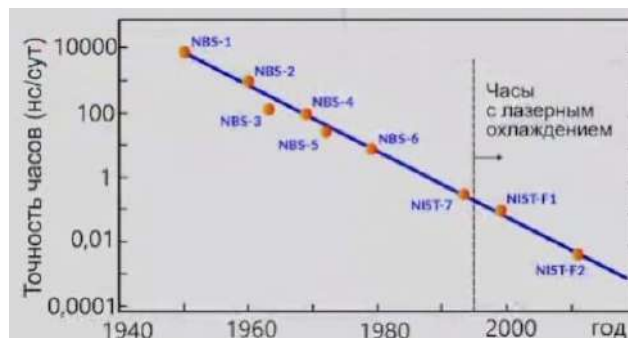


Рис. 11.21. Уменьшение ошибки измерения времени с помощью атомных часов начиная с 1940х годов

Урок 12. Время и навигация

12.1. Спутниковые системы глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС и др.)

В современном мире существуют невероятно точные атомные часы, которые ошибаются на 1 секунду за время жизни Вселенной. Такая точность используется в жизни.

У современного человека есть и часовый механизм, и навигатор, который позволяет точно рассчитать путь, найти дорогу в данную точку, куда он направляется.

Оказывается, точные часы – основа навигации.



Рис. 12.1. Устройства навигации

Системы глобального позиционирования.

В мире существует *GPS – Global Positioning System* ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система (в России), и др. В других странах также существуют свои национальные спутниковые системы навигации.

Их работа основана на передаче показаний точных (атомных) бортовых часов по радиоканалу на все навигационные приборы.

Информации о положении спутников и точном времени на их борту достаточно для определения положения в пространстве любого навигационного прибора

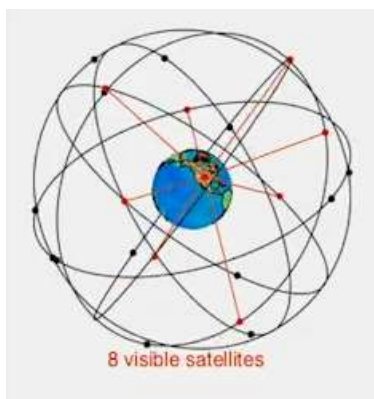


Рис. 12.2. Системы глобального позиционирования

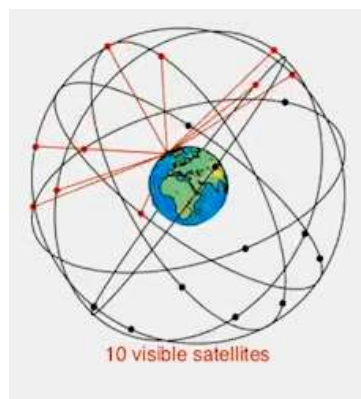


Рис. 12.3. Системы глобального позиционирования

В центре рисунка 12.4 показан спутник – один из многочисленных спутников системы ГЛОНАСС. На борту спутника работает точный атомный часовой механизм. Спутник постоянно передает во все стороны сигналы точного времени. Гаджет человека (например, навигатор в телефоне) получает сигналы и сравнивает с временем, которое вырабатывается внутри этого прибора. Радиосигнал затратил какое-то время Δt для того, чтобы добраться от спутника до нашего технического средства. Умножим время Δt на скорость света, с которой распространяются радиоволны, и найдем расстояние от спутника. Сравнивая время, которое было в момент отправки сигнала, с моментом получения радиосигнала – находят расстояние от спутника.

Каждый спутник GPS раз в несколько дней передает расписание своего движения по орбите вокруг Земли. Наш аппарат знает точное месторасположения спутника в тот момент, когда он отправил радиосигнал с записью точного времени. Таким образом, на рисунке 12.4 наша точка находится где-то на поверхности сферы.

Для более точного определения месторасположения подключаются еще спутники, где наше положение аналогично вычисляется относительно них. Две сферы пересекаются и сужают наше месторасположение до окружности.

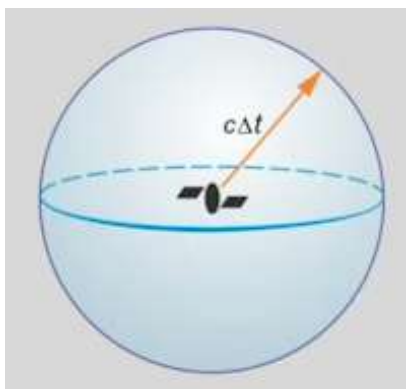


Рис. 12.4. Спутник ГЛОНАСС

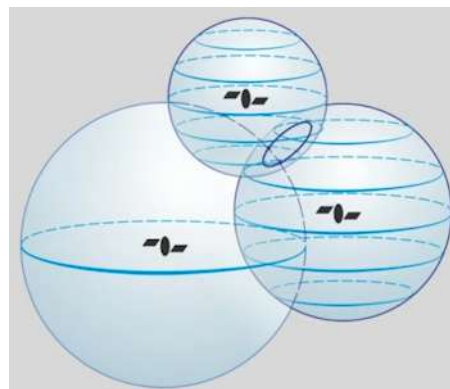


Рис. 12.5. Спутники ГЛОНАСС

На борту спутников летают точные атомные часы, а в гаджетах не очень точные (кварцевые). Для того, чтобы вычислить поправку времени, необходимо получить сигнал от четвертого спутника (рис. 12.6).

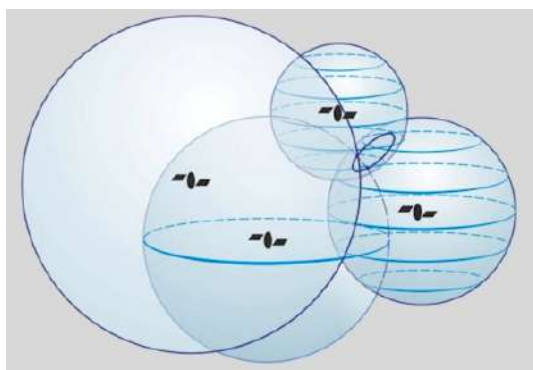


Рис. 12.6. Спутники ГЛОНАСС

Таким образом, мы узнаем три координаты в пространстве и точное время. Так работает любая спутниковая система навигации.

12. 2. Измерение времени: время в быту (гражданское время), Всемирное время (GMT), декретное время, летнее и зимнее время, координированное время. Календарь.

Время в быту

Время в быту, которое мы используем:

- истинное солнечное;
- среднее солнечное;
- поясное (зонное);
- всемирное (UT);
- декретное;
- зимнее / летнее;
- координированное;
- московское время, его мы используем в быту.



Рис. 12.7. Часы Спасской башни



Рис. 12.8. Часы Спасской башни

Гражданское время – устаревшее понятие, равно как и астрономическое время. Их использовали в ту эпоху, когда астрономы отсчитывали время от полудня, а простые граждане – от полуночи, т. е. до 1925 г.

Солнце движется неравномерно: если каждый день выходить в полдень и наблюдать за положением Солнца, то можно заметить, что Солнце описывает траекторию кривой, которая называется *аналеммой*.

Аналема – геометрическое место положений центра Солнца в течение года.

Тень гномона на солнечных часах указывает истинное солнечное время. Но наше время в быту основано на среднем солнечном времени, текущем равномерно. Разницу между ними, показывает аналемма.



Рис. 12.9. Аналемма

Всемирное время

Всемирное время, или время по Гринвичу – *UT – Universal Time* или *GMT – Greenwich Mean Time* – среднее солнечное время на меридиане Гринвича, т.е. время на нулевом меридиане $\lambda = 0^\circ$.

Часовые пояса и зоны

На рисунке 12.10 показаны часовые зоны (*Time zones*) Земли в 2013 г. Океан четко поделен на часовые зоны по 15 градусов шириной. А разбиение суши постоянно меняется, так как меняются географические границы разных стран, меняются разбиения внутри одной и той же страны на области, республики. Поэтому все время приходится проводить немного новые границы часовых зон.



Рис. 12.10. Часовые пояса и зоны

Некоторые государства меняют свое время не на целое число часов от Гринвича, а на полчаса или полтора часа (рис. 12.11). Так, на территории Индии, Ирана, Афганистана не целым числом часов время отличается от Гринвича. А, например, в Непале время отличается от времени Гринвича на 5 часов 45 минут. Почему время в Непале отличается на 15 минут от времени в Индии – неизвестно.

В Китае нет деления на часовые зоны – все жители живут по одному времени.



Рис. 12.11. Часовые пояса и зоны

Россию поделили на часовые зоны, потому что наша страна, рекордно протяженная по географической долготе: нельзя жить по одному времени в Калининграде и на Камчатке. На данный момент, разбиение на часовые зоны в России выглядит как на рисунке 12.12.



Рис. 12.12. Часовые зоны России на 28 октября 2018 года. Указано отличие их местного времени от московского ($T_{мск}$)

Московское время отличается на 3 часа от Гринвича.

Сезонное (летнее/зимнее) время

Летнее и зимнее время было введено по необходимости. Впервые это произошло в годы Первой Мировой войны – в начале 20 века. Тогда была необходимость экономии электричества. Летом, когда Солнце восходило раньше. Необходимо было заставить людей просыпаться раньше на работу, для чего ввели перевод часов.



Рис. 12.13. Карта перехода на летнее/зимнее время в разных странах мира

Летнее время = Зимнее (стандартное) время + 1^h.

В Западной Европе к 2021 г. откажутся от сезонного времени.

Декретное время

Декретное время = Поясное время + 1^h

Декрет – это приказ, указ, постановление правительства.

Этот порядок исчисления времени вводился декретом Со Советской власти в ряде регионов страны в 1919-1924 гг. и был окончательно установлен тремя постановлениями

Правительства СССР в 1930 - 1931 годах. В дальнейшем в разных регионах страны декретное время хаотически отменялось и восстанавливалось. Особенно бурно это происходило в период распада СССР (1988-91 г.).

Фактически декретное время до сих пор действует в Российской Федерации.

Московское время

Московское время (МСК, MSK) – время часовой зоны, в которой расположена столица Российской Федерации – город Москва. Это время действует в большинстве регионов европейской части России. С 26 октября 2014 г.:

$$T_{MSK} = UTC + 3^h$$

Через территорию Москвы проходит меридиан $37,5^\circ$ в. д., являющийся границей 2-го ($UTC + 2^h$) и 3-го ($UTC + 3^h$) географических часовых поясов. Центр города ($\lambda = 37,616^\circ$) находится восточнее этой границы, в 3-м часовом поясе.

Местное среднее солнечное время в центре Москвы $UTC + 02^h 30^m 28^s$

Координированное время UTC

Система счета времени должна быть устойчивой.

Всемирное координированное время (англ. *Coordinated Universal Time*, фр. *Temps Universel Coordonné*; UTC) – стандарт, по которому общество регулирует часы. Всемирное координированное время связывает ход атомных часов с восходами и заходами Солнца. Время отличается на целое число секунд от атомного времени, добавляя или отнимая в счете атомного времени «високосную секунду» (leap second). Дважды в год позволяется ввести лишнюю секунду в атомное время. Такая високосная секунда вводится не каждый год. Так, например, в 2017, 2018 и 2019 годах Земля вращалась равномерно, и добавлять секунду не пришлось. В нынешнем году, возможно, придется отнять одну секунду, так как Земля немного ускорилаь.



Рис. 12.14. Вращение Земли

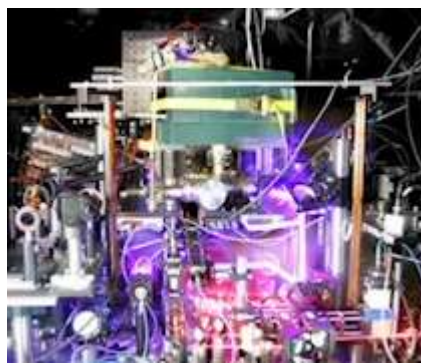


Рис. 12.15. Атомные часы

Календарь

Календарь – это система счисления больших промежутков времени, основанная на периодичности движения небесных тел:

- Солнца – в солнечных календарях,
- Луны – в лунных календарях и одновременно
- Солнца и Луны в лунно-солнечных календарях.

Разные люди в разные эпохи жили по разным календарям. Одни ориентировались на движение Солнца, его годичное перемещение, другие жили по Лунному календарю.

Европейская цивилизация пользуется солнечным календарём, в котором нелегко добиться целочисленного сочетания средних солнечных суток, недель и месяцев в году.

Поскольку мы хотим, чтобы Новый год каждый раз наступал в полночь, основная задача – добиться целого числа дней в году – необходимо согласовать целое число суток.

Первый наиболее научный календарь, созданный с помощью астрономов, ввел в обиход Ю. Цезарь. Юлианский календарь (Ю. Цезарь, 45 г. до н.э.) – 365,25 суток. Каждый четвертый (високосный) год длится на сутки дольше (29 февраля). Ошибка составила 1 сутки за 128 лет.

В следующие эпохи измерения показали, что не совсем на четверть суток укладывается движение Земли вокруг Солнца. Это привело к тому, что за 1500 лет набежало лишнее количество суток и Земля, в одни и те же дни года оказывалась в иных точках орбиты.

Тогда был введен *Григорианский календарь* (п.р. Григорий XIII, 1582 г.) – 365,2425 суток. Годы целых столетий лишь один из четырёх високосный (1800, 1900, 2000, 2100...). Ошибка составляет 1 сутки за 3300 лет.

Тропический год – интервал времени между прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия $T_{2000,0} = 365,2421897$ средних солнечных суток.

Урок 13. Видимое движение небесных тел

В космосе движется всё: спутники вокруг планет, планеты вокруг звёзд; сами звёзды и даже галактики.

Видимое движение светил довольно сложно выглядит для человека, который сам находится на планете, постоянно испытывающей разные движения: вращение вокруг собственной оси, движется вокруг Солнца и т.д.

13.1. Взаимные конфигурации планет

Рассмотрим, как взаимное положение планет и звезд меняется с течением времени на небосводе.

Астрономы выделяют несколько характерных конфигураций планет, т.е. относительных положений (как правило, относительно Солнца). Именно положение планет относительно Солнца сильно влияет на возможность астрономических наблюдений этой планеты. Если планета находится на небе на небольшом угловом расстоянии от Солнца, то ее практически невозможно изучить. Днем небо от рассеянного света в лучшем случае голубое, а иногда покрыто облаками – увидеть на этом фоне планету и детали ее поверхности довольно сложно. Именно поэтому астрономы ждут специальных моментов, когда планета удаляется от Солнца.

На рисунке 13.1 показаны характерные конфигурации, которые выделяют астрономы. Рассмотрим внутренние планеты – те планеты, орбиты которых находятся внутри орбиты Земли: например, Венера или Меркурий. Они имеют четыре характерных положения:

1) *Нижнее соединение.*

Традиционным представлением считается, что Солнце находится выше, т.е. дальше от Земли, а планеты ближе к Земле.

2) *Наибольшая западная элонгация*

3) *Верхнее соединение.*

Планеты находятся точно за Солнцем.

4) *Наибольшая восточная элонгация*

Положение наибольшей элонгации соответствуют моменту, когда планета удаляется на максимальное угловое расстояние от Солнца: либо к востоку, либо к западу.

Именно в наибольшей элонгации наблюдать за Венерой и Меркурием для астрономов лучше всего.

Для внешних планет, орбиты которых находятся дальше от Солнца, чем земная, есть четыре характерных положения:

1) Противостояние.

2) Соединение.

3) Восточная квадратура.

4) Западная квадратура.

Особенно интересные положения – это противостояние и соединение.

Положение *соединения* предполагает, что наблюдатель видит планету практически в том же направлении, что и Солнце. Формально, угол составляет практически ноль. Для наблюдения конфигурация соединения – бесполезна.

Положение *противостояния* определяет, что для земного наблюдателя Солнце и исследуемая планета находятся в противоположных направлениях. В полночь планета видна высоко над горизонтом, в южной стороне неба (для жителей северного полушария), и хорошо освещена Солнцем – идеальный момент для изучения планеты в телескоп.

Существует еще положение восточной и западной квадратуры. Под квадратурой понимается такое положение планеты, что угол «планета-Земля-Солнце» равен 90 градусам. Для современной астрономии такие конфигурации малозначимы.

Наиболее известное положение противостояния – это противостояния Марса, а особенно «Великие» противостояния Марса. «Великими» называют те ситуации, когда, двигаясь по эллиптической орбите Марс ближе всего подходит к Земле в момент противостояния – наиболее удобное положение для изучения. Такие события бывают не очень часто: примерно один раз в 15 – 17 лет.



Рис. 13.1. Взаимные конфигурации планет

Парад планет

Существуют моменты, когда все планеты собираются в одной области неба – эти события называют *парадами планет*.

Изображение парада планет, когда все планеты выстраиваются в ряд, на рисунке 13.2 является неправильным. Художники, сделавшие данную картинку, имели

неправильное представление об этом понятии. На самом деле, планеты никогда не занимают такого положения друг относительно друга.

В прошлом году, 4 июля 2020 года был парад планет. Многие журналисты добавляли в свои статьи именно такие, неправильные рисунки и изображения.



Рис. 13.2. Неправильное представление парада планет

На самом деле, парад планет 4 июля 2020 года выглядел как показано на схеме (рис. 13.3): планеты по отношению к Солнцу находились с одной стороны. Нептун и Уран находятся за пределами кадра рисунка 13.3, но направление на них отмечено стрелками.

Для земного наблюдателя часть планет были видны на одной стороне неба, часть планет – на другой.

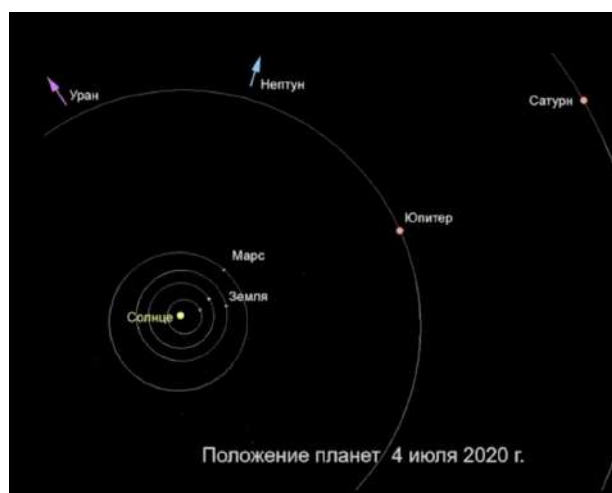


Рис. 13.3. Парад планет 4 июля 2020 года

На рисунке 13.4 показана карта парада планет (29 января 2016 года), созданная электронным планетарием. На фотографии сразу два события: парад планет и полнолуние.

Во время парада планет, любой любитель астрономии мог выйти со своим телескопом и одновременно наблюдать на небе планеты – это очень яркое зрелище.

Таким образом, парад планет – это приблизительное сочетание планет в одной части неба относительно Солнца.

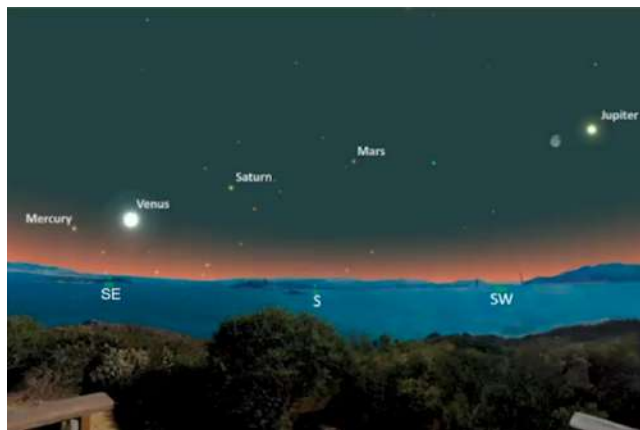


Рис. 13.4. Карта парада планет 29 января 2016, созданная электронным планетарием

13.2. Видимое движение небесных тел

Видимое движение небесных тел происходит прежде всего, потому что вращается Земля (рис. 13.5). Каждая звезда при этом испытывает суточное движение относительно горизонта (рис. 13.6). Вращение происходит вокруг северного небесного полюса. Астрономы часто говорят *северного полюса мира*.

Небесный полюс (полюс мира) – точка, куда смотрит ось вращения Земли.

Комментарий: старое русское слово «мир» имело несколько разных смыслов:

- в поговорке «на миру и смерть красна» слово мир употреблялось в значении «среди людей»;
- мир, как период между войнами;
- мир, как вся Вселенная.

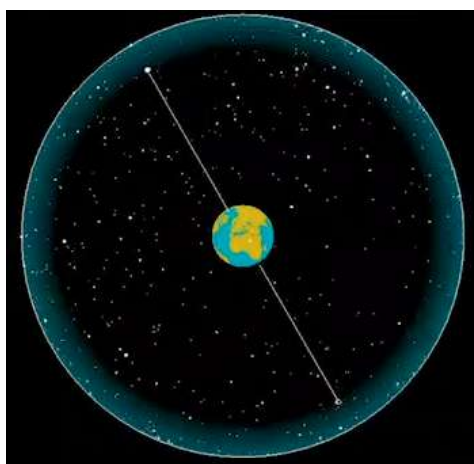


Рис. 13.5. Вращение Земли

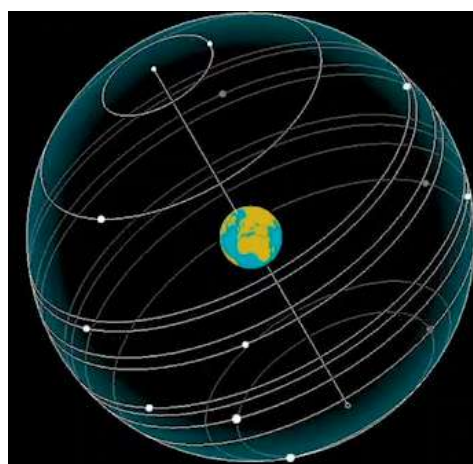


Рис. 13.6. Представление о движении звезд и планет

Именно поэтому, астрономы по привычке употребляют терминологию: Северный полюс мира и Южный полюс мира.

Видимые изменения Луны

Особенно заметно видимо изменение при наблюдении ночью за Луной. Существуют доли Луны: освещенная Солнцем и не освещенная Солнцем – *смена фаз Луны*.

В течение месяца угловой размер Луны меняется на небосводе. Кроме этого, Луна испытывает покачивания как по долготе, так и по широте.



Рис. 13.7. Правая доля Луны
освещена Солнцем



Рис. 13.8. Левая доля Луны освещена
Солнцем

Смена лунных фаз

На Земле луна видна в одном направлении, а Солнце в другом. Солнечные лучи освещают и Землю, и Луну. В течение месяца Луна движется относительно Земли, делая оборот по орбите. Поэтому Луну видно с разных направлений относительно солнечного света.

На рисунке 13. 9 показано и как мы видим Луну с Земли, и ее истинное положение на орбите. Таким образом, внешний вид Луны меняется, потому что наблюдатель смотрит на нее в течение месяца с разных направлений, относительно падающего на Землю и на Луну солнечного света.

Покачивания и изменения размера Луны связаны с тем, что она вращается по орбите, которая не совсем круговая. Орбита Луны немного деформирована и имеет форму эллипса. Т.е. одну половину месяца луна находится чуть дальше от Земли, а вторую половину месяца – чуть ближе (рис. 13.10). Самые предельные точки называются перигей и апогей.

Перигей – самая приближенная точка.

Апогей – самая удаленная точка.

На рисунке 13.10 буквой *b* обозначен *восход*, буквой *c* обозначен *закат*, *A* – апогей, *P* – перигей.

Именно поэтому, когда Луна находится в положении перигея – наблюдатель с Земли видит ее диск немного более крупным.

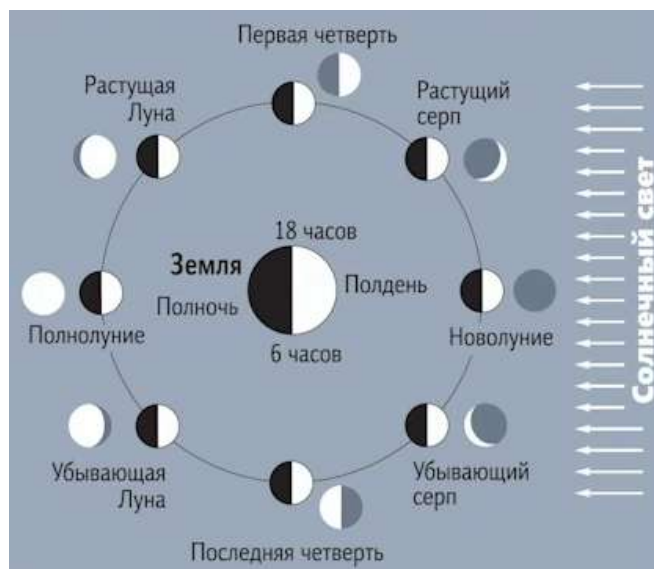


Рис. 13.9. Смена Лунных фаз

Либрации Луны по долготе вызваны её равномерным вращением вокруг оси в купе с неравномерным движением по орбите.

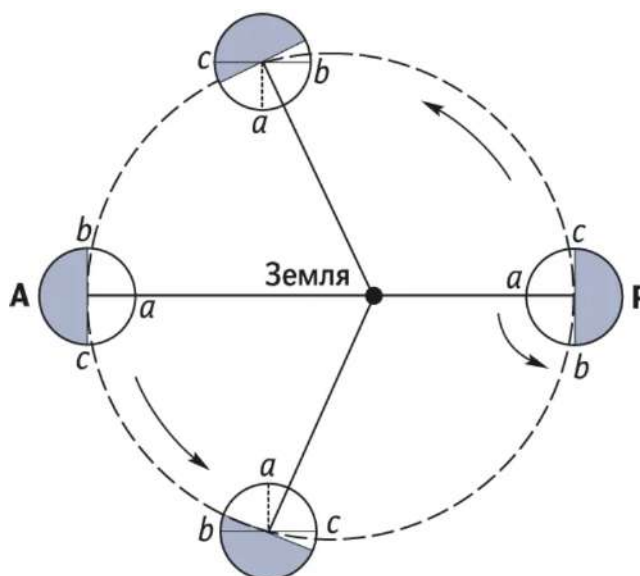


Рис. 13.10. Либрации Луны по долготе

Либрации Луны по широте вызваны наклоном её оси вращения к плоскости орбиты.

За месяц Луна совершает один оборот вокруг Земли и один оборот вокруг своей оси. Именно поэтому, всегда видно только одно полушарие Луны. Обратную сторону Луны с Земли увидеть невозможно.

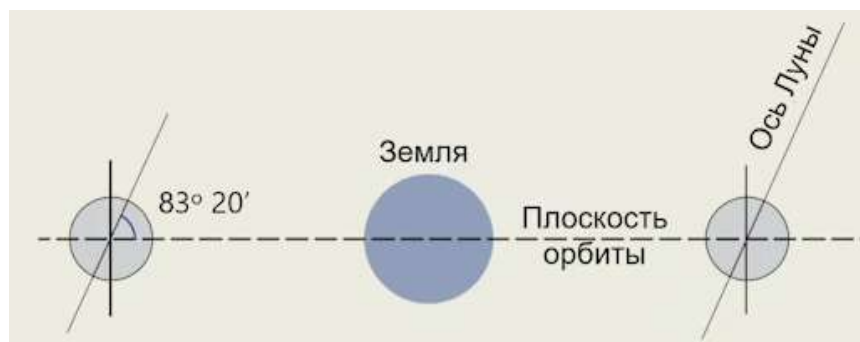


Рис. 13.11. Либрации Луны по широте

В одной половине месяца лучше видна область южного полушария Луны, в другой половине месяца лучше видна область северного полушария. Этот процесс аналогичен тому, как Земля движется вокруг Солнца: полгода больше повернуто одно полушарие к Солнцу, полгода другое. По этой причине происходит смена сезонов года.

Видимое движение планет

В древние века ученые стали замечать, что некоторые яркие светила перемещаются на фоне далеких звезд. Этот факт привел их в недоумение.

На рисунках 13.12 и 13.13 показано перемещение Марса с июля 2007 года по июнь 2008 года: планета перемещалась с запада на восток, затем останавливалась – на рисунке 13.12 отмечено это положение, которое называется *точкой стояния*. Далее планета движется в обратном направлении с востока на запад – *ретроградное* (обратное) движение планеты, снова останавливается и продолжает двигаться с запада на восток.

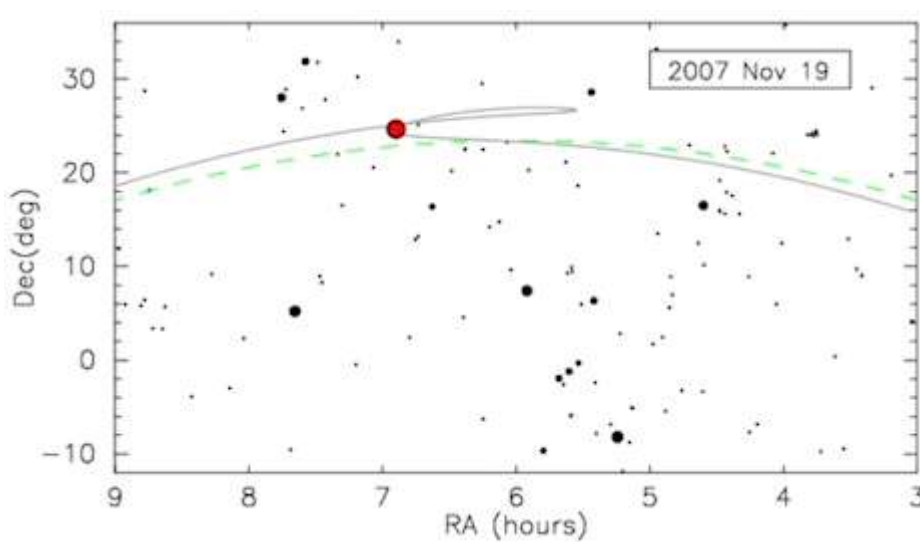


Рис. 13.12. Движение Марса по небу с июля 2007 г. по июнь 2008 г.

- *Dec* – declination, склонение
- *RA* – right ascension, прямое восхождение

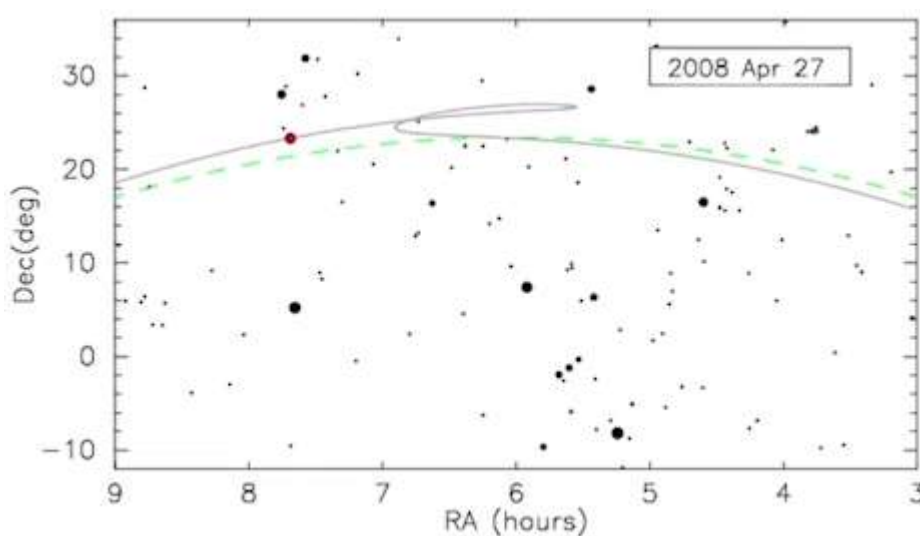


Рис. 13.13. Движение Марса по небу с июля 2007 г. по июнь 2008 г.

Ученые не знали, как объяснить такую кинематику движения планет. Им приходилось предвычислять определенные схемы, чтобы заранее прогнозировать положение планеты в данный момент года.

Деферент и эпицикл

Астрономы Вавилона и Др. Греции (особенно греческий астроном Гиппарх) разрабатывали удачную математическую схему для описания видимого движения планет. Неравномерное и попятное видимое движение планеты сводилось к её равномерному движению по малой окружности (эпициклу), центр которой равномерно движется по большей окружности (деференту), в центре которой находится Земля.



Рис. 13.14. Деферент и эпицикл

Такое представление соответствует представлению того, что Земля находится в центре системы – *геоцентрическая система*.

Геоцентрическая система

Если не хватало одно эпицикла – на него накладывали второй/третий/четвертый и так далее.

В книге Клавдия Птолемея (II век н. э.) древнегреческая астрономия обрела законченную математическую форму в виде геоцентрической системы мира. Название книги Птолемея «Альмагест» осталось таким, какое ей дали арабские ученые при переводе. На русский язык эта книга была переведена чуть более 20 лет назад.

Не смотря на то, что в корне теории лежало представление о геоцентрической системе, она использовалась. Современный математик прекрасно понимает основу этой теории: любое периодическое движение, каким бы сложным оно не было, можно представить набором круговых движений. В математике это называется разложением сложного движения в набор элементарных круговых движений – разложение функции в ряд Фурье.



Рис. 13.15. Древнегреческая астрономия (К. Птолемей)



Рис. 13.16. Видимое движение планет.
Геоцентрическая система

Гелиоцентрическая система.

Позднее теория Птолемея перестала удовлетворять точным наблюдениям и неправильно прогнозировала движение планет.

Первым основу теории изменил польский математик – Николай Коперник (рис. 13.17).



Рис. 13.17. Николай Коперник (1473 – 1543)

Николай Коперник предложил переместить Солнце в центр планетной конфигурации. Оказалось, что такая теория точнее и проще объясняла движение планет Солнечной системы. В дальнейшем она получила свое развитие: был переход от круговых орбит к эллиптическим.

Теория Коперника была большим шагом вперед не только в математическом отношении, но и в мировоззренческом, т.к. Библия трактовала Землю, как неподвижную основу нашего мира. Гелиоцентрическая система мира быстро завоевала популярность, что вызвало борьбу старого и нового мировоззрения.

В настоящее время понятно, что движение Марса по его орбите и движение Земли по ее орбите – неравномерно. Эти два неравномерных взаимно происходящих движения относительно Солнца, приводят к тому, что Марс и другие планеты описывают сложные петлеобразные траектории движения на звездном фоне.

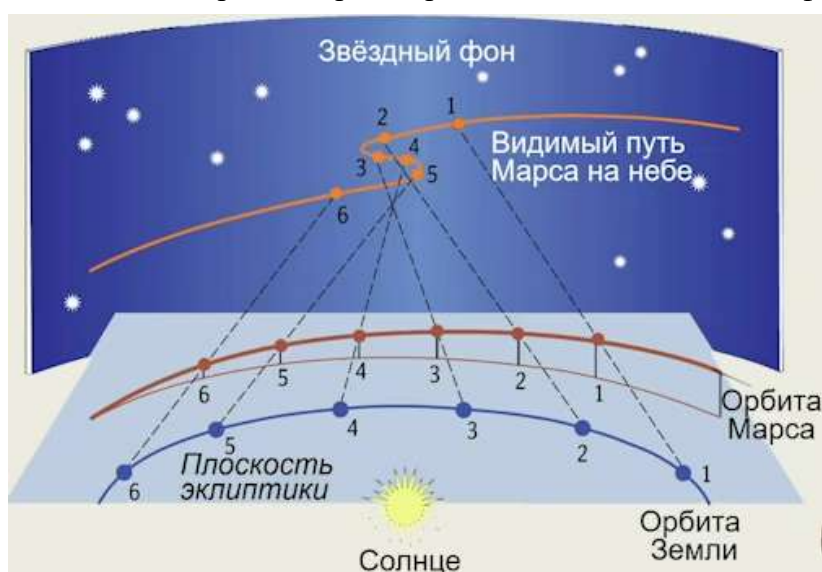


Рис. 13.18. Видимое движение планет. Гелиоцентрическая система

Урок 14. Законы Кеплера и физика Ньютона

Видимое движение планет происходит очень сложно, поэтому люди долго не могли понять, какая теория и какие представления о движении планет могут объяснить это передвижение.

В конце концов древние греки поняли, что необходимо придумать новую математическую конструкцию: эпициклы и деференты. *Деферент* – это главная окружность, по которой, как казалось древним грекам, движется Солнце вокруг Земли. А *эпициклы* – это маленькие окружности, которые позволяют сделать равномерное круговое движение более сложным, петлеобразным.

В конце средневековья Николай Коперник понял, что эта система усложнена. Если предположить, что Солнце стоит в центре Солнечной системы, а все планеты движутся вокруг Солнца, то система эпициклов и деферентов становится более простой. К сожалению, Николай Коперник не мог отойти от понятия о равномерном, круговом движении. Его система, хоть уже и была гелиоцентрической, тоже содержала деференты и эпициклы. Тем не менее, она была прогрессивной.

14.1. Эмпирические законы Кеплера

Система Николая Коперника была неидеальной. Это выяснилось, когда астрономы научились измерять положение планеты со все более высокой точностью.



Рис. 14.1. Старая пекинская обсерватория

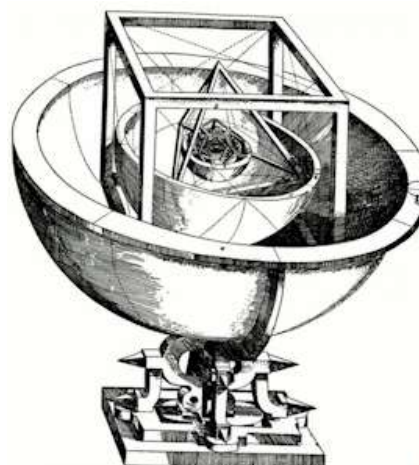


Рис. 14.2. «Кубок Кеплера» модель Солнечной системы из пяти платоновых тел

Рост точности наблюдений

Тихо Браге (1546-1601) – датский дворянин, астроном, астролог и алхимик. Большие финансовые возможности позволяли ему легко заниматься наукой. Так он увлекался алхимией и астрономией. Однажды, его особенно поразило появление новой звезды – ему казалось, что в древних каталогах все звезды перечислены. Многие видели эту звезду, но именно Тихо Браге стал внимательно ее изучать: как меняется ее блеск,

не перемещается ли она среди других звезд. Так его увлечение астрономией сделало его ведущим астрономом той эпохи.

Главным достижением Тихо Браге стало то, что первым в Европе начал проводить систематические высокоточные астрономические измерения. Он создал самые точные неоптические угломерные приборы.



Рис. 14.3. Тихо Браге

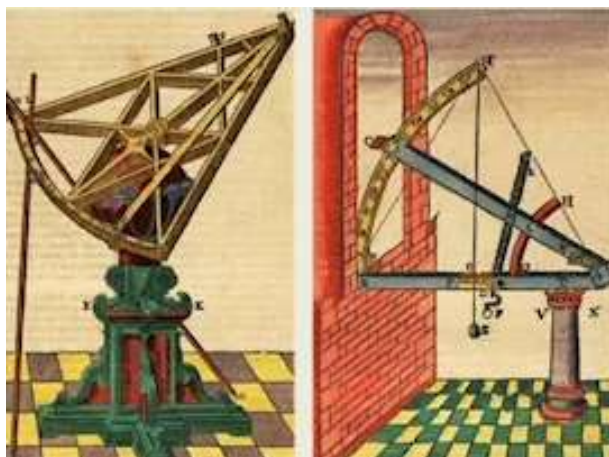


Рис. 14.4. Точные неоптические угломерные приборы

Несколько десятилетий Тихо Браге наблюдал положение планет. Особенно его интересовал Марс, потому что, в отличие от другие планет, он быстрее перемещается, так как находится ближе всего к Земле.

Шведский король поддержал Тихо Браге и дал ему право владеть небольшим островом (рис 14.5). Там ученый построил сначала одну большую качественную обсерваторию, потом вторую небольшую.

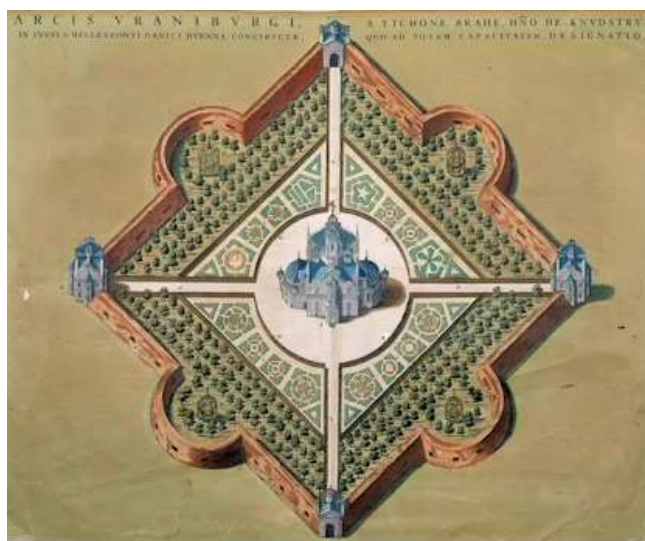


Рис. 14.5. Обсерватория Тихо Браге «Ураниборг» построена в 1577 г. на острове Вен в проливе Эресунн между Мальмё (Швеция) и Копенгагеном (Дания)

В те годы телескопы еще не были изобретены, и астрономы пользовались армиллярными сферами, квадрантами, секстантами.

Тихо Браге 20 лет измерял движение планет, накопил огромный материал. Однако в 1597 году, лишившись королевской поддержки, покинул Данию.



Рис. 14.6. Обсерватория Тихо Браге



Рис. 14.7. Армиллярные сферы

После переезда в Прагу Тихо Браге понял, что накопленное им колоссальное количество наблюдательных фактов он не может привести в единую систему. На тот момент ему было ясно, что теория движения планет Коперника недостаточно точно предсказывает их положения на небе.

Достигнутая точность наблюдений Тихо Браге с помощью невооруженного глаза, вероятно, уже никогда не будет превзойдена: человеческий глаз разделяет по отдельности две точки, удаленные по углу не менее чем на 2 угловые минуты. Люди с очень острым зрением могут разделить два объекта с помощью глаза не точнее, чем до 1 угловой минуты. Именно с такой точностью Тихо Браге определил положение Марса, но превратить это в математическую закономерность он не смог. Поэтому в 1600 г. Тихо Браге пригласил Иоганна Кеплера для помощи в обработке наблюдений Марса.



Рис. 14.8. Иоганн Кеплер

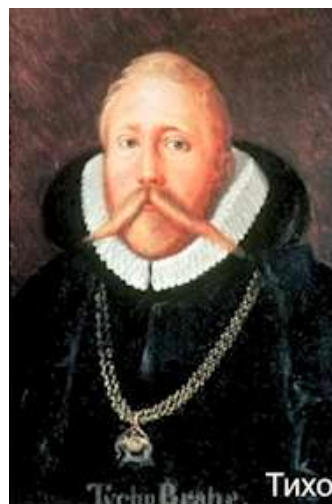


Рис. 14.9. Тихо Браге

В своих работах Тихо Браге старался сохранить общий библейский подход, т.е. Земля в центре мира. В то же время, он понимал, что движение планет проще описать, если они обращаются вокруг Солнца. Поэтому он совместил две теории и сделал Землю в центре мира, вокруг Земли вращалась Луна и Солнце, но все остальные планеты вращались вокруг Солнца.



Рис. 14.10. Система Тихо Браге

Иоганн Кеплер – немецкий математик.

После смерти Тихо Браге осталось большое количество материала и наблюдений. Тогда Кеплер занялся разработкой теории движения планет.

Для представления планетных орбит Кеплер испытал различные кривые и в конце концов понял, что лучше всего подходят эллипсы, в одном из фокусов которых находится неподвижное Солнце.

Эллипс от части похож на сжатую деформированную окружность. У окружности, ставшей эллипсом, появляются новые свойства: у окружности был один центр, у эллипса он тоже есть, но еще есть две точки, называемые *фокусами*. Кеплер понял, что в один из фокусов надо поставить Солнце и пустить планеты по эллиптической орбите.

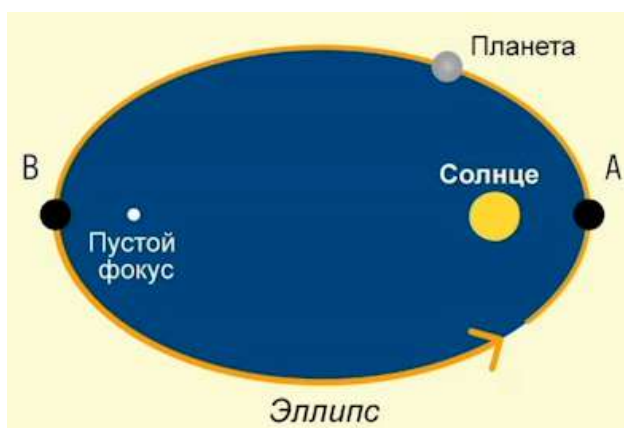


Рис. 14.11. Эллиптические планетарные орбиты по Кеплеру

Ближайшая точка орбиты называлась *перигелием*, а самая удаленная точка – *афелием*.

Во второй фокус ничего не помещали, поэтому он называется *пустым*.

Для изображения эллипса можно использовать одно из его свойств: сумма расстояний от любой точки эллипса до двух его фокусов постоянна, т. е. одинакова. Чем дальше фокусы находятся друг относительно друга, тем более вытянутой получится эллиптическая кривая.



Рис. 14.12. Свойство эллипса

Математики описывают эллипс несколькими его свойствами: расстоянием между его фокусами, размером большой полуоси, и т.д.

Эллипс – это сжатая или наклоненная окружность. Степень его сжатия характеризует эксцентриситет ($0 < e < 1$). Кроме центра у него две важные точки – фокусы.

Параметры эллипса (рис. 14.13):

- AB – большая ось;
- CD – малая ось;
- AO – большая полуось (a);
- DO – малая полуось (b);
- M – точка эллипса;
- O – центр;
- F_1 и F_2 – фокусы;
- $e = FO/a$ – эксцентриситет – степень сжимаемости эллипса.

Таким образом, описать эллипс легко, а вычислить движение планеты значительно сложнее.

Законы Кеплера

Иоганн Кеплер был очень сильным математиком. Он нашел несколько свойств, которые описывают движение планеты по эллиптическим орбитам.

Первый и второй законы Кеплера:

1. Планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Скорость движения планеты плавно меняется по мере того, как она сначала приближается к Солнцу, потом удаляется. Прямая между планетой и Солнцем (радиус-вектор) «заметает» (покрывает) площади, пропорциональные времени. В настоящее время понятно, что это результат закона сохранения орбитального момента/момента импульса.

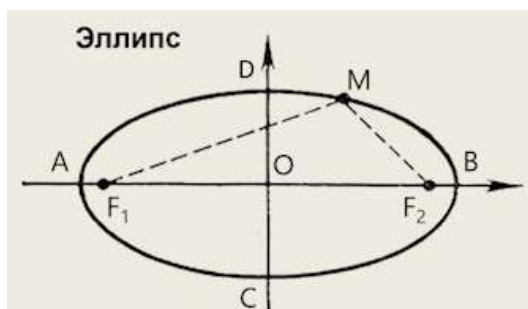


Рис. 14.13. Параметры эллипса

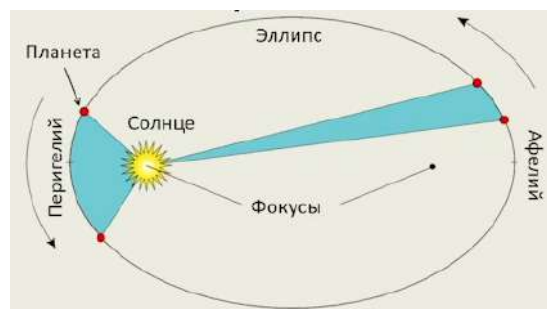


Рис. 14.14. Законы Кеплера

Движение Земли происходит по эллиптической орбите. Эксцентриситеты орбит планет Солнечной системы близки к нулю. Только у Меркурия орбита заметно эллиптическая.

Однако, это не значит, что остальные планеты Вселенной движутся по слабо сжатым эллиптическим орбитам. На данный момент обнаружено тысячи экзопланетных систем – многие из этих планет движутся по весьма эллиптическим траекториям. Поэтому планетные орбиты – разнообразны.

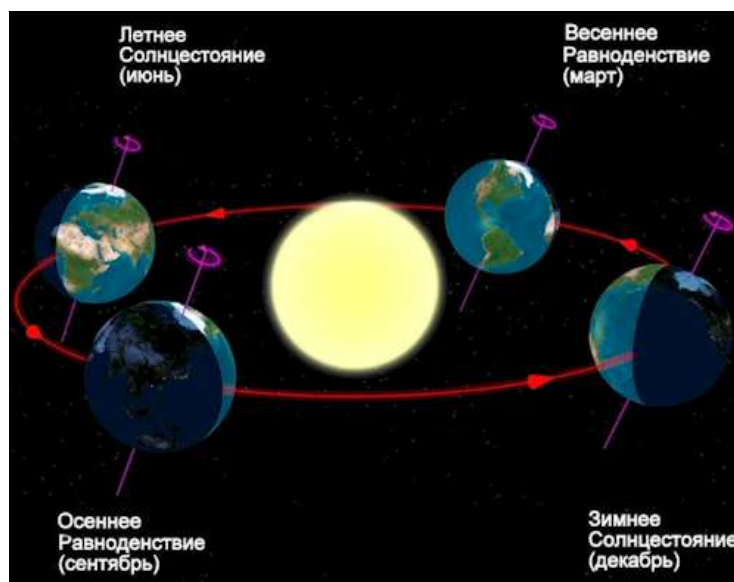


Рис. 14.15. Движение земли по эллиптической орбите

Астрономам известны моменты года, когда Земля наибольшим образом наклонена и демонстрирует Солнцу свой северный/южный полюс. Эти моменты называются *солнцестоянием* (летним или зимним).

На рисунке 14.16 видно, что с моментами летнего и зимнего противостояния Солнца совпадают моменты прохождения Земли через перигелий и афелий. Это значит, что в момент. Когда Земля находится в перигелии, солнечные лучи больше ее освещают и нагревают. Но в северном полушарии в этот момент – конец декабря, т.е. эпоха зимнего солнцестояния. В северном полушарии солнечные лучи падают под небольшим углом и слабо освещают поверхность, даже несмотря на то, что Земля более приближена к Солнцу. Этот процесс сглаживает колебания температуры в северном полушарии нашей планеты. Аналогично, происходит летом, когда планета чуть более удалена от Солнца, что ослабляет факт того, что лучи падают «отвесно». Таким образом, жителям Северного полушария почти точное совпадение перигелия и зимнего солнцестояния, афелия и летнего солнцестояния – благоприятно: у нас не очень холодная зима, не очень жаркое лето.

Третий закон Кеплера

Еще несколько лет Кеплер работал, изучая движение Марса и других планет. Он хотел выяснить, как связано движение двух планет между собой.

Движение двух планет по двум орбитам связано следующим соотношением:

$$\left(\frac{T_A}{T_B}\right)^2 = \left(\frac{R_A}{R_B}\right)^3$$

T_A и T_B – периоды обращения планет по их орбитам

R_A и R_B – средние расстояния планет от Солнца (большие полуоси орбит)

Таким образом, *третий закон Кеплера*: квадраты времён обращения планет по орбитам пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца.



Рис. 14.16. Близкое совпадение перигелия, афелия с зимним и летним солнцестояниями

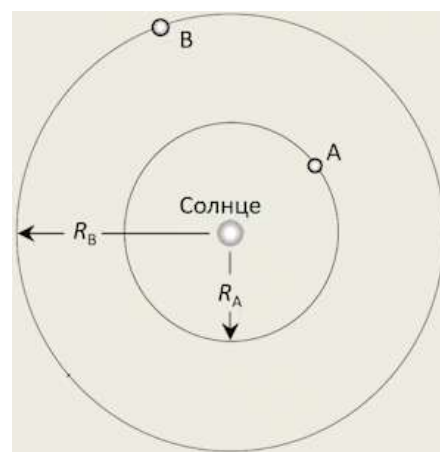


Рис. 14.17. Связь движения двух планет

Применение 3-го закона Кеплера

Таким образом, третий закон Кеплера позволяет, зная размер орбиты, вычислить ее орбитальный период.

Измеряя размер орбиты в астрономических единицах и орбитальный период в годах, получим: $T = \sqrt{R^3}$, для Нептуна $T = \sqrt{30^3} = 164$ года.

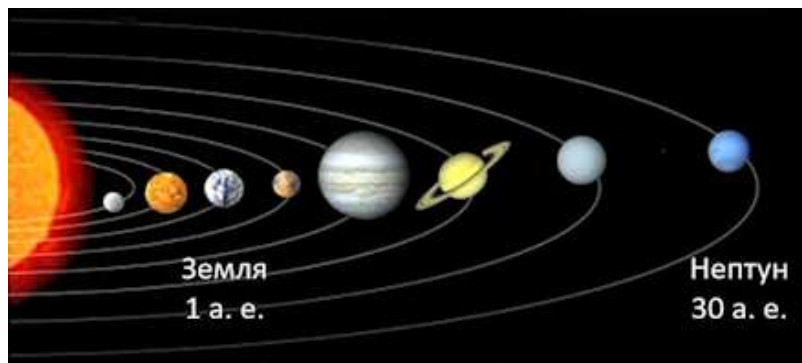


Рис. 14.18. Движение планет по орбитам

Законами Кеплера пользуются довольно часто. Даже в космонавтике есть смысл применять эти законы, не вдаваясь в какие-либо физические обоснования. Достаточно знать третий закон Кеплера, чтобы, например, вычислить время перелета с одной планеты на другую. (рис. 14.19).

В среднем, время перелета от Земли к Марсу составляет 8.5 месяцев.



Рис. 14.19. Схема перелета с Земли на Марс

14.2. Физические законы Ньютона

В течение полувека астрономы использовали законы Кеплера, но не находили им математического и физического обоснования. Очевидно, что обоснование должно было прийти от какой-либо фундаментальной науки.

Начало физике положил Галилео Галилей, но точку в это работе поставил Исаак Ньютон (1642-1727).

Исаак Ньютон создал научную монографию: «Математические основания (принципы) натуральной философии» (перевод с латинского языка).

Комментарий: философией в те времена называли любую науку; натуральной называли те науки, что описывали природу – в настоящее время мы употребляем слово естествознание.



Рис. 14.20. Исаак Ньютон

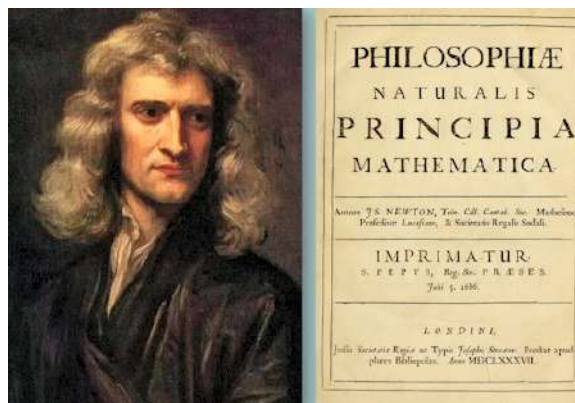


Рис. 14.21. Монография И. Ньютона

Законы механики и гравитации Ньютона

В монографии Ньютона были описаны основные принципы движения небесных объектов. Более того, Ньютон понял, каким образом крупные массы притягиваются друг к другу. В ту эпоху еще не было возможности изучать притяжение малых масс в лабораториях.

Эмпирические законы (правила) Кеплера помогли Ньютону сформулировать строгие законы механики и гравитации:

$$F = \frac{GMm}{R^2}$$

Сила притяжения F двух тел прямо пропорциональна произведению их масс (M и m) и обратно пропорциональна квадрату расстояния R между ними.

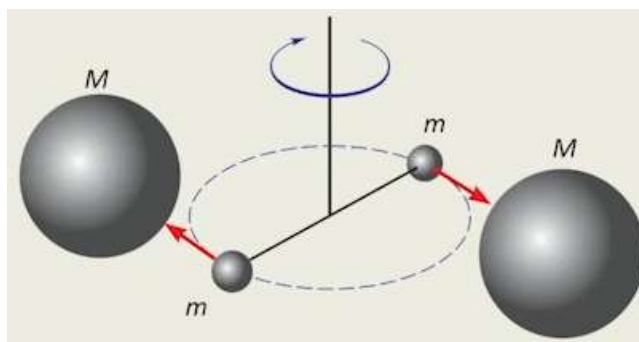


Рис. 14.22. Притяжение масс

Исаак Ньютон подвел под эмпирические законы Кеплера физическую основу.

Во-первых, И. Ньютон расширил законы Кеплера: два тела, притягивающиеся друг к другу, могут двигаться не только по замкнутым эллиптическим орбитам, но и по открытым, разомкнутым кривым – *гиперболам*. Движение под действием гравитации происходит по одному из конических сечений.

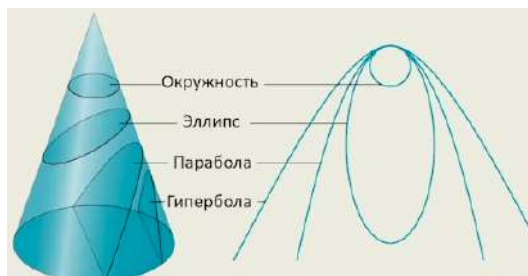


Рис. 14.23. Конические сечения

Таким образом, Ньютон описал движение тел и заметил одну неточность в формулировках Кеплера: если два тела движутся под действием общего притяжения, то и второе, более массивное тело тоже испытывает движение вокруг общего центра масс. Это значило, что закон Кеплера должен был быть немного модифицирован.

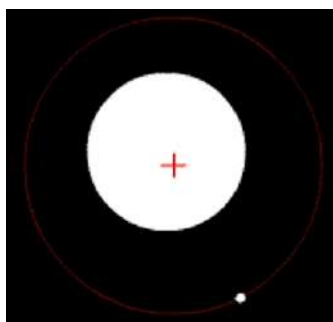


Рис. 14.24. Движение двух тел
вокруг общего центра масс

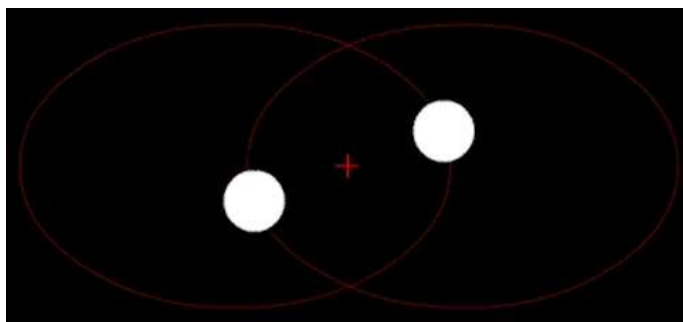


Рис. 14.25. Модификация закона Кеплера

Если два тела, имеют одинаковые массы, то неизвестно, какое из них центральное – оба тела движутся вокруг общего центра масс (рис. 14.25). Но необходимо было модифицировать закон, связанный с размером орбиты и периодом движения по ней. Это можно было сделать, если перейти от системы отсчета, связанной с центром масс в систему отсчета, связанную с одним из тел (рис. 14.26).

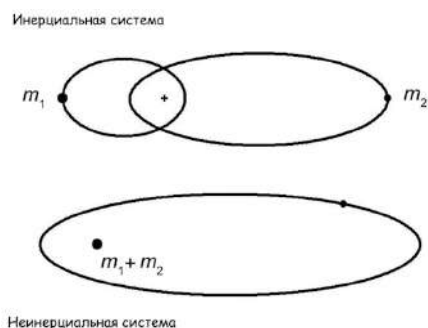


Рис. 14.26. Инерциальная и неинерциальная системы

Тогда одно тело будет неподвижным, а другое будет совершать движение вокруг неподвижного тела. Такая система называется *неинерциальной системой*.

Ньютон модифицировал формулировку третьего закона Кеплера (рис.14.27):

$$\frac{T_A^2}{T_B^2} \cdot \frac{M + m_A}{M + m_B} = \frac{R_A^3}{R_B^3}.$$

По этой формулировке учитывались не только квадраты орбитальных периодов, но и отношения масс. В такой форме третий закон Кеплера имеет математическое и физическое обоснование, и им пользуются современные астрономы и физики.

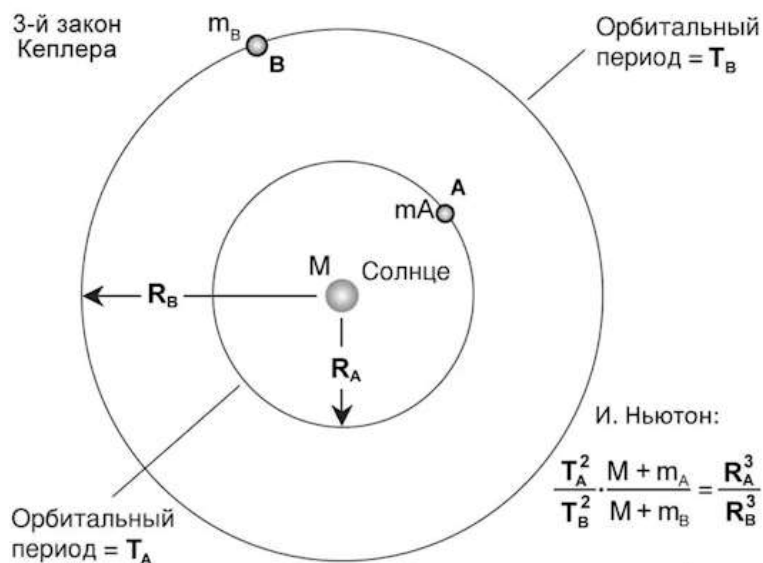


Рис. 14.27. Модификация 3 закона Кеплера

Урок 15. Космические полеты и черные дыры

Многие ученые трудились над созданием теории о движении небесных тел: основу свой наблюдений заложил Тихо Браге, математический аппарат подвел под эти наблюдения – Иоганн Кеплер, который вывел три закона, описывающие движения планет вокруг Солнца: эллиптические орбиты; движение планет по орбитам происходит с переменной скоростью; связь периодов орбитальных движений и размеры орбит двух разных планет. Позже, Исаак Ньютон подвел под эти эмпирические законы физическую и математическую базу, т.е. создал *небесную механику*.

Небесная механика – это не образное выражение, а официальное название науки, занимающейся расчетом движения небесных тел. Эта наука получила быстрое развитие, сначала при изучении и объяснении планетных орбит, и позже, когда люди научились создавать и запускать в космос космические аппараты, ее аппарат стал использоваться для расчетов их движения.

15.1. Космические полеты и ракетная техника

С 1957 года, после запуска первого спутника в нашей стране, космонавтика из области математических расчетов перешла в область практических исследований. Основанием для небесной космонавтики служит теория Исаака Ньютона.

Небесная механика.

В формуле Ньютона, определяющей силу взаимного гравитационного притяжения двух тел с массами M и m фигурирует лишь одно значение расстояния между ними – R , хотя каждое из них состоит из многих частей, расположенных на разном расстоянии друг от друга.

Закон Ньютона:

$$F = \frac{GMm}{R^2}.$$

Рассмотрим ситуацию: спутник летает вокруг планеты и притягивается ко всем элементам этой планеты. Все эти части находятся на разном расстоянии от спутника: одни близко, другие дальше. Значит в законе Ньютона должны фигурировать разные R расстояния. Значит, необходимо каким-то образом проинтегрировать притяжение спутника к каждому элементу. Этим можно было бы пренебречь, если бы космический аппарат летал очень далеко от планеты – тогда расстояние R было бы практически одинаковым до любой точки планеты. Этот факт помогает небесным механикам помогать притяжение между двумя планетами, размеры которых очень большие, но и планеты находятся друг от друга очень далеко. Однако, космический аппарат находится очень близко (несколько сотен километров) от поверхности планеты, которая имеет радиус ~ 6400 км (радиус Земли). Вычислить такую силу притяжения спутника и Земли – очень сложно. Еще одной важной задачей является вычисление силы притяжения, если тело находится внутри планеты. Такая задача актуальная для геофизиков, которые изучают: как разные слои планеты сжимаются вышележащими

слоями, как они притягиваются друг к другу; как устроена планета внутри; как меняется плотность, давление с погружением в недра.

Ньютон доказал, что сферически симметричные тела тоже притягивают, как материальные точки. Это существенно упростило расчеты движения звёзд, планет и космических аппаратов.



Рис. 15.1. Исаак
Ньютон

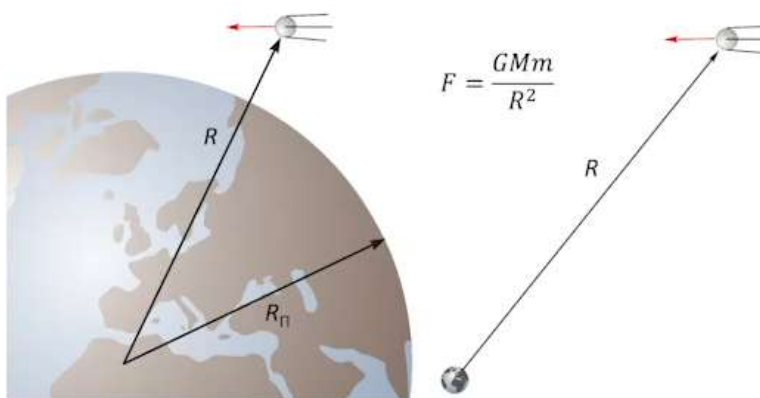


Рис. 15.2. Притяжение двух тел

Исаак Ньютон создал две фундаментальные теоремы, которые помогли решить вышеописанные задачи.

Теоремы Ньютона.

Теорема Ньютона о гравитации внутри однородной сферы.

Если планета сферически симметричная, даже если плотность меняется от поверхности к центру, планету можно представить как набор сфер разной плотности (рис. 15.3).

Выделим два элемента, тогда:

- 1) Площадь элемента пропорциональна квадрату расстояния:

$$S \sim R^2.$$

- 2) Сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$F \sim \frac{S}{R^2}.$$

- 3) Силы по модулю равны:

$$F_1 = F_2$$

Эта теорема важна для геофизики.

Для астрономов важно узнать, как точка, находящаяся вне планеты, притягивается к ней. Для этого есть вторая теорема Ньютона.

Теорема Ньютона о гравитации вне однородной сферы (в точке А): точка, находящаяся вне сферически симметричной массы, притягивается к ней так, как будто вся масса сосредоточена в центре сферы.

Доказательство:

$$dU = -\frac{G2\pi R^2 \sin\varphi d\varphi}{l}$$

$$l^2 = R^2 + r^2 - 2Rr \cos\varphi$$

$$dU = -\frac{2\pi GR}{r} dl$$

$$\Delta l = 2R.$$

Потенциал сферы:

$$U = -\frac{4\pi GR^2}{r} = -\frac{GM}{r}.$$

Ускорение:

$$a = \frac{dU}{dr} = \frac{GM}{r^2}.$$

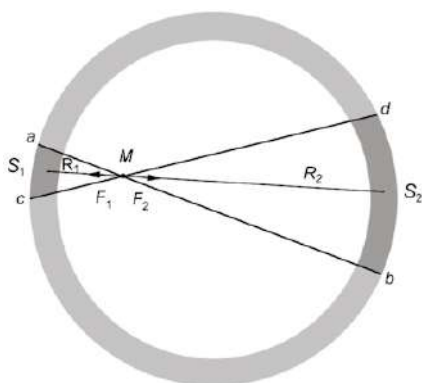


Рис. 15.3. Теорема о гравитации внутри однородной сферы

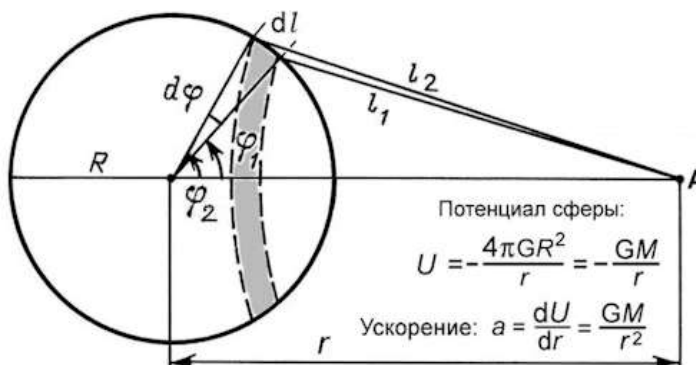


Рис. 15.4. Теорема Ньютона о гравитации вне однородной сферы

Замкнутые и незамкнутые орбиты

Замкнутые орбиты, в общем случае, эллиптические, поскольку окружность – частный случай эллипса. А незамкнутые орбиты, в общем случае, гиперболические, поскольку парабола – это граница между эллипсом и гиперболой.

Поэтому, в зависимости от начальной скорости, космический аппарат движется по эллипсу или по гиперболе.

При описании движения искусственных тел (космических аппаратов или орбитальных станций), их орбиты описываются параметрами. Параметры орбиты искусственного спутника Земли:

- R_3 – радиус Земли
- A – апогей

- Π – перигей
- a – большая полуось
- h_A – высота в апогее
- h_{Π} – высота в перигее
- Q – расстояние от центра Земли в апогее
- q – расстояние от центра Земли в перигее

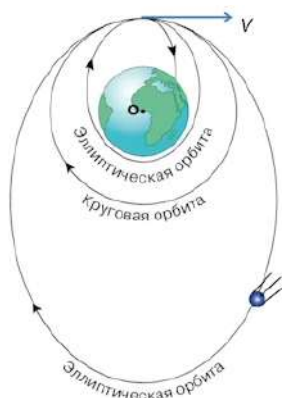


Рис. 15.5. Траектория движения космического аппарата в зависимости от начальной скорости

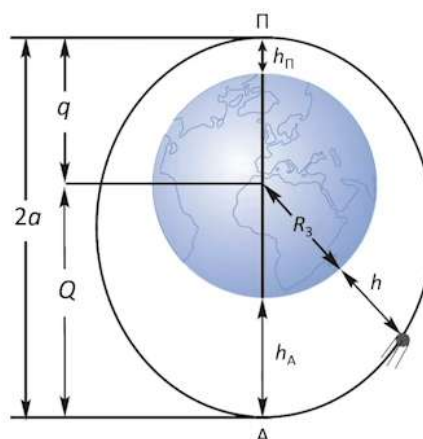


Рис. 15.6. Параметры орбиты искусственного спутника Земли

Законы Кеплера.

В случае, если тело бросается с такой скоростью, чтобы оно вышло на круговую орбиту (рис. 15.7), в зависимости от направления броска круговая орбита получается не всегда.

Движение по кругу происходит, если существует центростремительное ускорение: $\frac{mV^2}{R}$. Эту роль играет сила притяжения. Таким образом, скорость движения по круговой орбите V_K :

$$\frac{mV^2}{R} = \frac{GMm}{R^2},$$

$$V_K = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Если подставить в формулу V_K массу и радиус Земли, получим:

$$V_I = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3}} = 7.9 \text{ км/с}$$

– это *первая космическая скорость*.

Запуская спутник, *важно* отправить его в направлении перпендикулярном центру Земли. Тогда спутник выйдет на круговую орбиту.

Космические полеты.

В космонавтике учитывается много важных моментов. Так, Земля сильно притягивает к себе все, что находится на ней и рядом с ней в космическом пространстве.

Главная проблема космонавтики состоит в том, как разогнать тело до такой скорости, чтобы преодолеть силу притяжения. Почти 8 км/с это в 24 – 25 раз больше скорости звука. Для сравнения, сверхзвуковые самолеты летают в 2,5 – 3 раза быстрее скорости звука. Чтобы достичь такой скорости, приходится делать, на данный момент, неэкономные космические системы.

На рисунке 15.8 показан космический корабль «Союз», масса которого составляет 7 т. Для того, чтобы вывести корабль на низкую, околоземную орбиту, приходится сооружать ракету массой около 300 т – почти все это – это топливо. Полезная нагрузка (космический корабль) составляет около 2% от массы транспортного средства. К тому же, ракеты – это одноразовый транспорт. По мере разгона ракеты, ее ступени сбрасываются на Землю.

В последние годы ракеты становятся все более технологичными. Иногда удается возвращать на Землю, по крайней мере, первые ступени, которые можно использовать повторно.

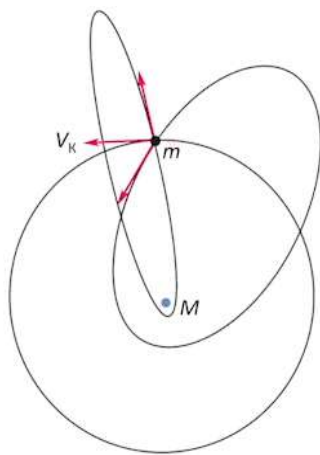


Рис. 15.7. Важность направления полета

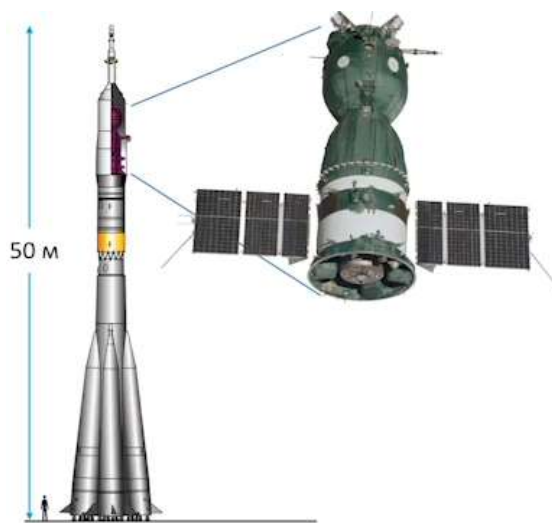


Рис. 15.8. Ракета-носитель «Союз» (Россия).
Стартовая масса 308 т. Масса конструкции ракеты 27 т. Масса топлива (горючее + окислитель) 274 т.

Самая интересная далекая орбита – это геостационарная орбита (рис. 15.9). Особенность ее в том, что орбитальный период движения космического спутника в

точности равен суточному периоду обращения Земли вокруг своей оси. Эта орбита удалена от центра Земли на 42 164 км. Если запустить такой спутник в плоскости земного экватора, то он будет постоянно находиться над одной точкой экватора нашей планеты. Для того, чтобы запустить такой аппарат на орбиту, его необходимо удалить от Земли, а потом разогнать до скорости 3 км. В настоящий момент в нашей стране используется ракета «Протон» (рис. 15.10). Полезная нагрузка на ее борту составляет 0,5% от стартовой массы.

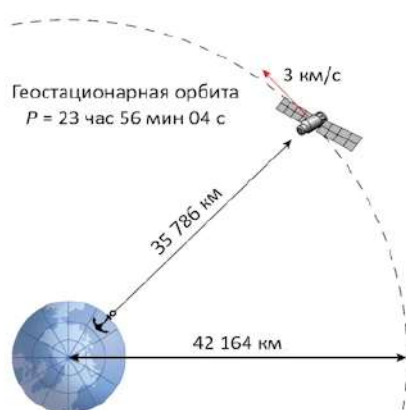


Рис. 15.9. Геостационарная орбита



Рис. 15.10. Ракета-носитель «Протон» (Россия)
705 т. Масса спутника на ГСО 3.7 т

Далеко от Земли можно отправиться, если аппарат выйдет на параболическую или гиперболическую орбиты (рис. 15.11).

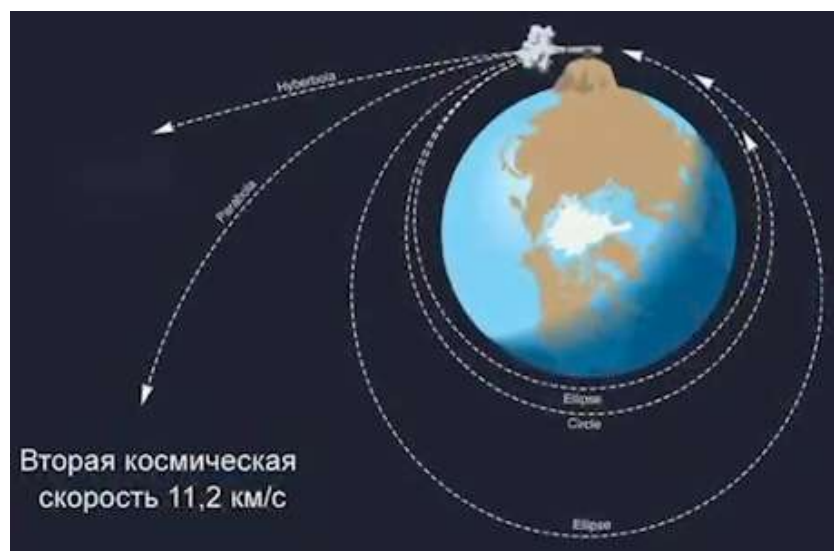


Рис. 15.11. Полет за пределы Земной орбиты

На рисунке 15.12 показана схема перелета от Земли к другой планете: для межпланетного полёта нужно иметь, как минимум, параболическую скорость:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{GMm}{R}$$

$$V_{\Pi} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2}V_K$$

Для поверхности земли $V_{\Pi} = 11,2$ км/с – вторая космическая скорость.

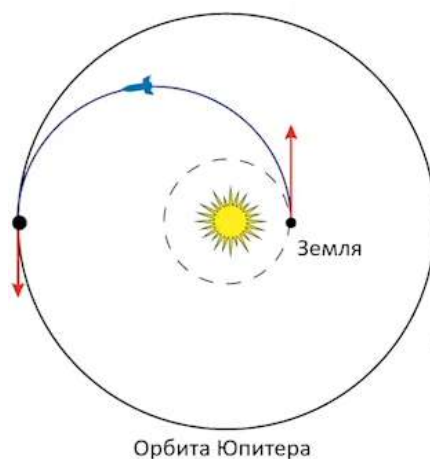


Рис. 15.12. Схема перелета от Земли к другой планете

Литература

Рекомендуемая литература: «Парадоксы космонавтики» (автор: А.А. Штерифельд).

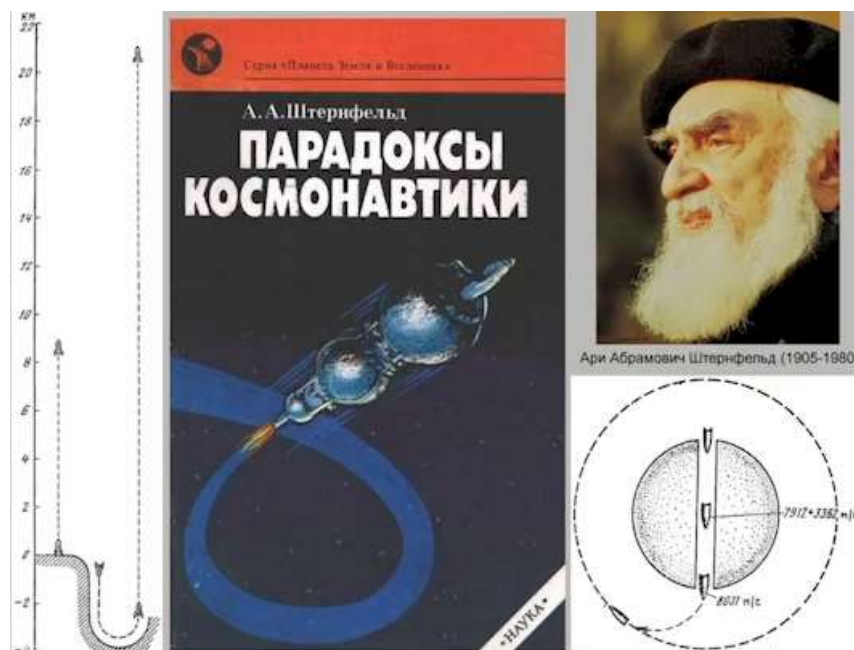


Рис. 15.13. «Парадоксы космонавтики». А.А. Штерифельд

15.2. Черные дыры – чистая гравитация

Черная дыра – это чистая гравитация, т.е. это тело, сжавшееся до такой степени, что ничего кроме гравитации вокруг него невозможно ощутить. Нельзя увидеть поверхность этого тела или строение.

История черных дыр началась с Исаака Ньютона (1684 – 1686), с его «Математических начал». Однако Ньютон не стал развивать эту тему далее.



Рис. 15.14. Математические начала И. Ньютона

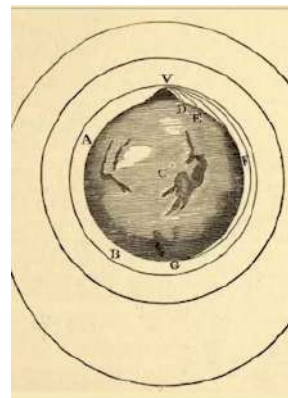


Рис. 15.15. Идея И. Ньютона

Идея «гравитационной могилы»

Джон Мичелл (*J. Michell, 1724-1793*) – английский геофизик и астроном. Используя законы Ньютона, Мичелл рассчитал, что если бы звезда с массой Солнца имела радиус не более 3 км, то даже частицы света (которые он, вслед за Ньютоном, считал корпускулами) не могли бы улететь далеко от такой звезды и она казалась бы издали абсолютно темной.

Эту идею Мичелл представил на заседании Лондонского Королевского общества 27 ноября 1783 г. Так родилась концепция "ньютоновской" черной дыры.

Точно такую же идею о невидимых массивных звездах высказал в своей книге "Система мира" (1796 г.) французский математик и астроном Лаплас без ссылок на Мичелла:

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

$$V_{esc} = c$$

$$R_{crit} = \frac{2GM}{c^2}$$

Третий раз к этой идее вернулись в начале 20 века, когда Альберт Эйнштейн создал практически новую физику: уточнил представления Ньютона о пространстве, времени, гравитации и силах. Сила гравитации в общей теории относительности

трактуются как геометрическое пространство – как искажение геометрии пространства и времени.

На базе теорий Эйнштейна (формул, описывающих движение космических тел) был сделан вывод о том, что могут быть такие тела, как черные дыры в нашем современном понимании.



Рис. 15.16. Пьер Симон Лаплас (1749 – 1827)

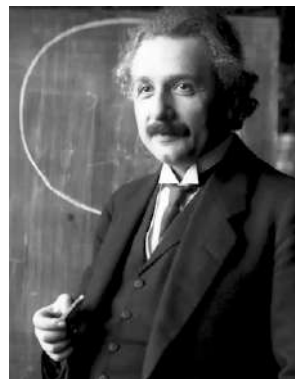


Рис. 15.17. А. Эйнштейн

В 1916 году, решив уравнение Эйнштейна, Карл Шварцшильд получил практически такой же ответ, как у Мичелла и Лапласа, т.е. тело меньшего размера так изменит вокруг себя свойства пространства и времени, что свет и любое тело окажется запертым внутри этого радиуса:

$$\frac{mc^2}{2} = \frac{GMm}{R} \rightarrow R_g = \frac{GMm}{c^2}$$

– радиус Шварцшильда или гравитационный радиус.

Сам термин «Черная дыра» родился позже – в середине 1960-х годов.

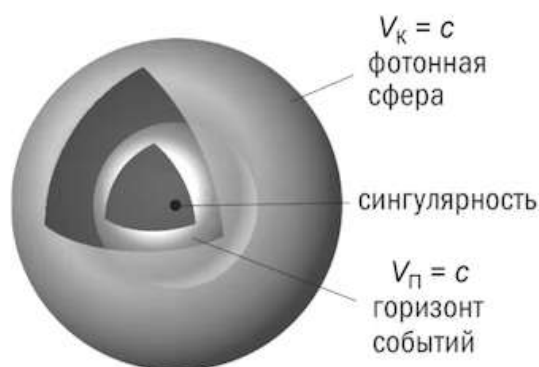


Рис. 15.18. Горизонт событий черной дыры и его радиус



Рис. 15.19. Карл Шварцшильд (1873 – 1916)

На рисунке 15.20 показана зависимость времени движения космического корабля к черной дыре от расстояния (2). до ее центра с точки зрения земного наблюдателя (1) и движущегося космонавта (2).

С точки зрения земного наблюдателя космический корабль никогда не проникнет внутрь черной дыры. С точки зрения космонавта он проникает внутрь черной дыры за конечное время (пунктирное изображение корабля).

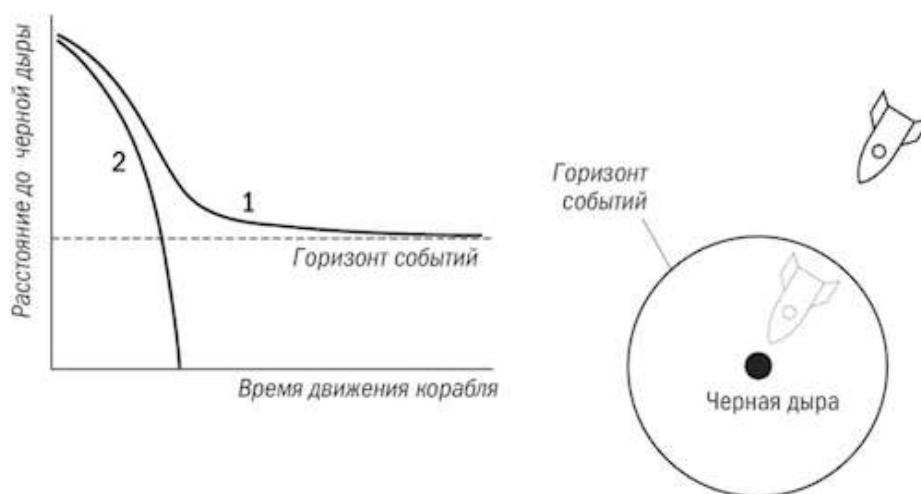


Рис. 15.20. Свойства черных дыр

Существование черных дыр было доказано астрономами. Осенью 2020 года астрономы *Reinharf Genzel* и *Andrea M. Ghez* получили Нобелевскую премию за обнаружение и исследование астрономическими методами черной дыры в центре нашей Галактики. Кроме того, они доказали, что такие же черные дыры есть в центре других соседних галактик.



Рис. 15.21. Reinharf Genzel



Рис. 15.22. Andrea M. Ghez

В рамках теории относительности Эйнштейна был сделан прогноз о том, что две черные дыры могут заявить о себе гравитационным излучением. Движение двух черных дыр вокруг одного общего центра масс должно искажать пространство и время. Это геометрическое искажение пролетит со скоростью света и может быть обнаружено учеными.

В 2017 году была присуждена Нобелевская премия трем американским физикам: Райнеру Вэйсу, Барри Баришу, Кипу Торну. Два из них – экспериментаторы, а один –

знаменитый физик-теоретик (Кип Торн). Они втроем возглавили проект по созданию гравитационно-волновых детекторов (телескопов). С их помощью были обнаружены сигналы, приходящие от черных дыр. Кроме того, астрономы заметили, как движутся звезды (рис. 15.24): по их орбитам стало понятно, что в центре нашей Галактики находится массивная черная дыра.

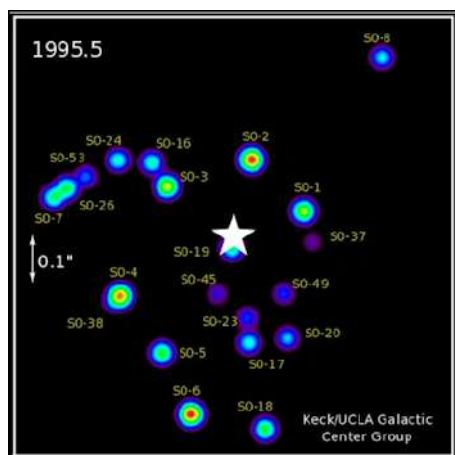


Рис. 15.23. Сигнал, пришедший от черной дыры

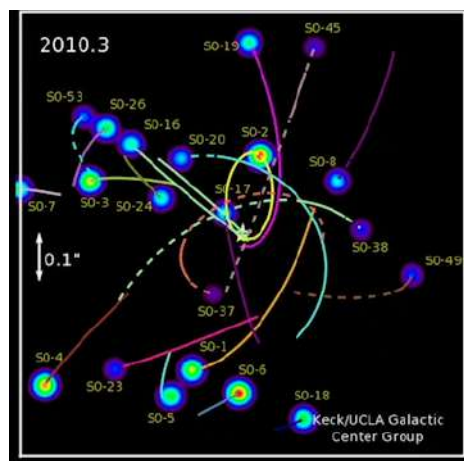


Рис. 15.24. Движение звезд в районе черной дыры

Литература

Рекомендуемая литература:

- Новиков И.Д. Чёрные дыры во Вселенной. М. 1977 Новиков И.Д. Чёрные дыры и Вселенная. М. 1985 Новиков И.Д. Энергетика чёрных дыр. М. 1986
- Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика чёрных дыр. М. 1986
- Чёрные дыры. Сб. М. 1978



Рис. 15.25. «Чёрные дыры и Вселенная». Новиков И.



Рис. 15.26. Новиков Игорь Дмитриевич

Урок 16. Приливы на Земле и в космосе

Приливы – это периодическое повышение и понижение уровня океана. На рисунке 16.1. показано как выглядит прилив на Земле.

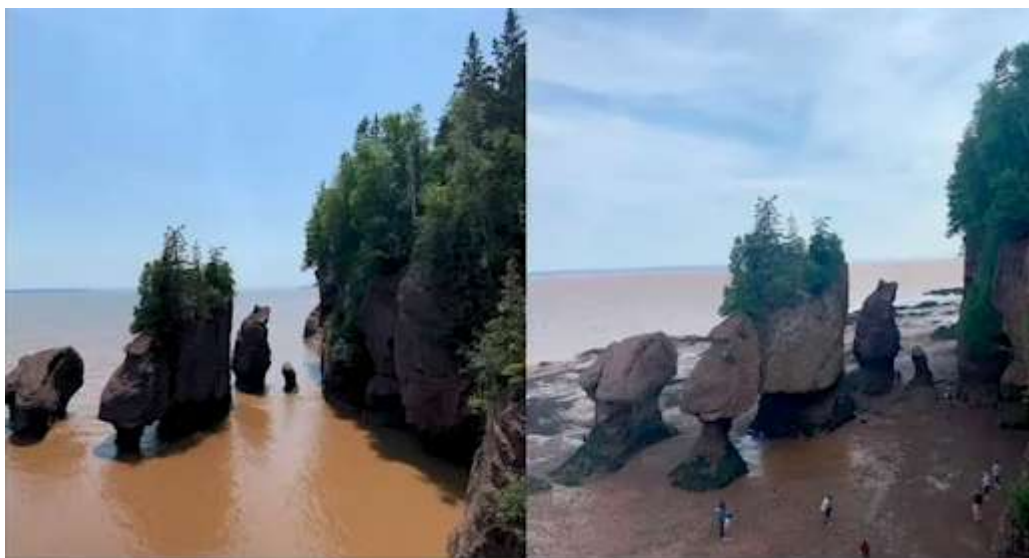


Рис. 16.1. Приливы на Земле

16.1. Приливный гравитационный эффект

Ньютон доказал, что сферические тела притягивают, как материальные точки. Значит, и сами они притягиваются, как материальные точки. Это верно для тела в целом. Но разные его части притягиваются по-разному.

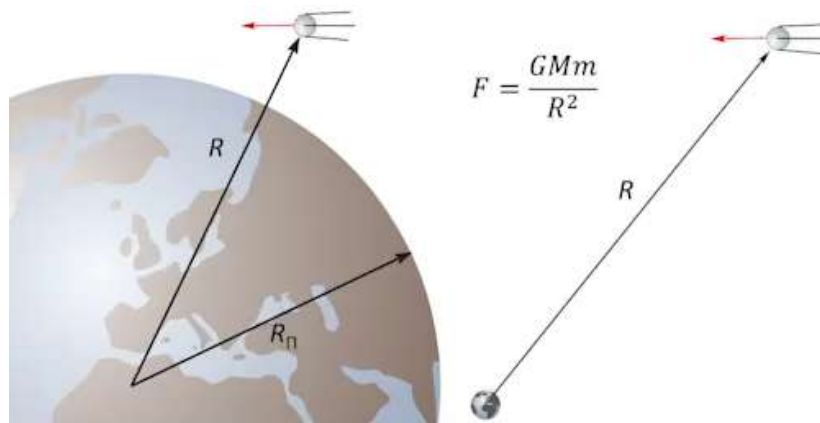


Рис. 16.2. Притяжение двух тел

Приливный эффект, возникающий из-за гравитационного воздействия внешней массы на протяженное тело, может деформировать его и изменить характер его движения.

Разные части протяженного тела по-разному притягиваются к внешней массе. Это вызывает напряжения в теле и его деформацию.

Демонстрация приливного эффекта в свободно падающем «лифте»: в неоднородном гравитационном поле свободные массы – чёрные точки – изменяют взаимное положение: их система вытягивается в направлении центра гравитации и сжимается в двух перпендикулярных направлениях

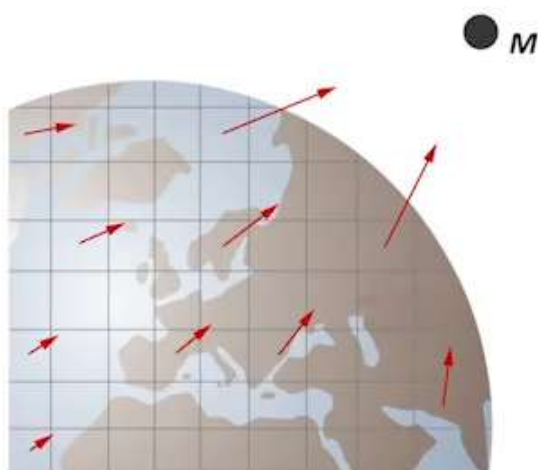


Рис. 16.3. Гравитационное воздействие внешней массы

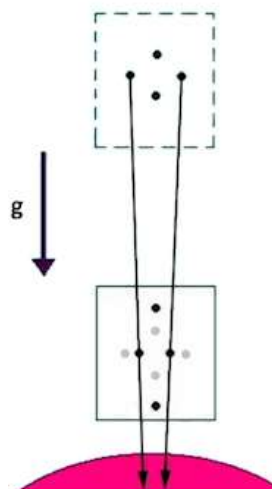


Рис. 16.4. Демонстрация приливного эффекта в свободно падающем «лифте»

Международная космическая станция

МКС – свободно падающая лаборатория.

Приливной эффект действует в космосе всегда, и при работе на МКС это необходимо учитывать.



Рис. 16.5. МКС



Рис. 16.6. МКС

Космонавты, работающие на внешней поверхности МКС, бывают снабжены реактивным прибором (ракетным ранцем) на случай непредвиденной потери контакта со станцией. Приливный эффект может прижать космонавта к станции, а может и удалить от неё.

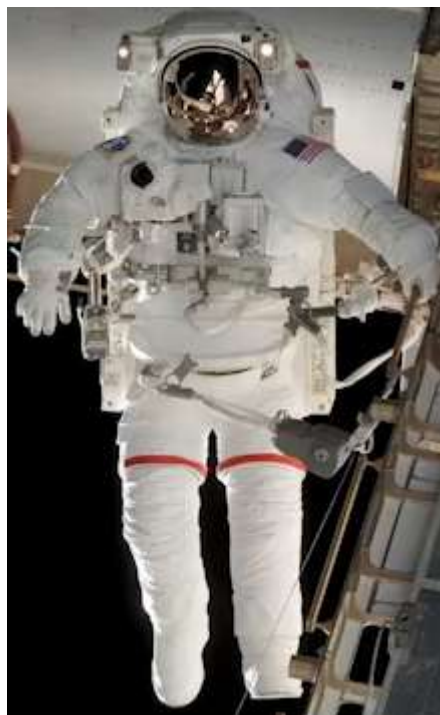


Рис. 16.7. Космонавт, работающий на внешней поверхности МКС

16. 2. Приливы на Земле и в системах планета - спутник

Приливы на поверхности нашей планеты действуют следующим образом: точки планеты находятся на разном расстоянии от внешнего тела. Пусть внешним телом будет, например, Луна. Наиболее близкая точка будет притягиваться к Луне с наибольшим ускорением, наиболее дальняя точка – с меньшим. Центр планеты будет иметь среднее значение ускорения между этими двумя точками.

Перейдём в систему отсчёта, связанную с центром планеты: от всех векторов отнимем вектор, связанный с центром планеты (рис. 16.9). Тогда получаем разность.

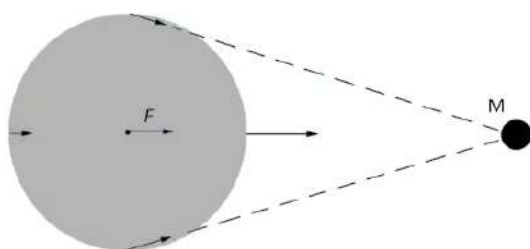


Рис. 16.8. Притяжение различных частей планеты к массе M .

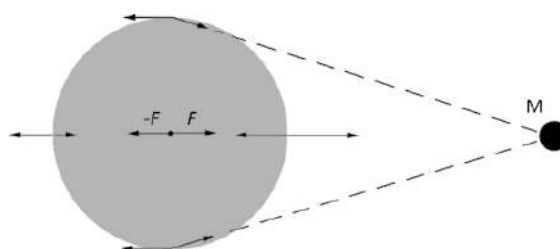


Рис. 16.9. Система отсчета, связанная с центром планеты.

Разность в ближайшей точке направлена к Луне. Разность в наиболее далекой точке направлена в противоположную от Луны сторону. Таким образом, планета растягивается в двух направлениях (вдоль планеты) и сжимается в двух

перпендикулярных направлениях. Разница сил относительно центра масс – это *приливные силы*.

Поле приливных сил на поверхности планеты показано на рисунке 16.11. Тело пытается принять эллипсообразную форму под действием силы притяжения.

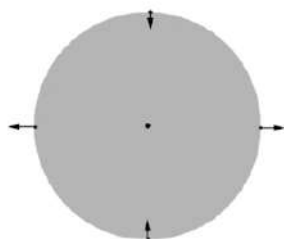


Рис. 16.10. Растяжение планеты
в двух направлениях

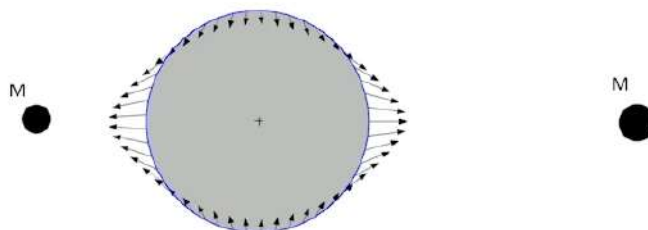


Рис. 16.11. Поле приливных сил на поверхности
планеты

Приливы на планете

На рисунке 16.12 показаны лунные приливы и отливы. Однако этот рисунок немного утрирован. Разность между уровнем океана в зонах прилива и отлива составляет около 1 м (при точных расчетах около 60-70 см).

Вытянутости Земли направлены в сторону Луны. В то же время, земной шар вращается (делает один оборот в течение суток), а Луна движется медленнее, поэтому твердая поверхность Земли движется быстрее относительно приливных выпуклостей.



Рис. 16.12. Лунные приливы и отливы в океанах Земли

Главные источники приливов на Земле – Луна и Солнце. На рисунке 16.13 показана симуляция приливов. Лунное приливное влияние вдвое сильнее солнечного. Иногда эти влияния складываются, и сила приливов становится выше, а иногда компенсируются друг за счет друга, тогда приливы оказываются меньше.

В новолуние и полнолунии приливные влияния складываются и это называется *сизигийным приливом*. В первой и последней четверти Луны, приливные влияния компенсируются и это называется *квадратурным приливом* (рис. 16.14).



Рис. 16.13. Приливы на планете

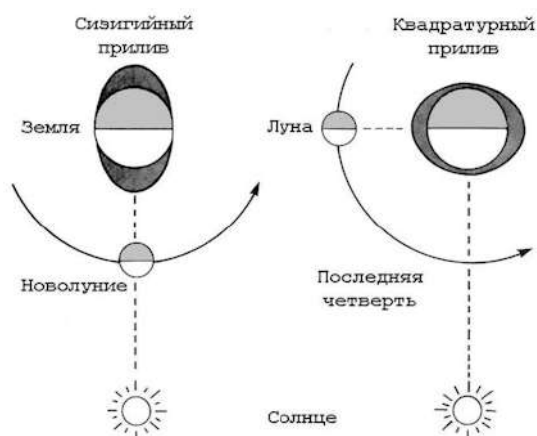


Рис. 16.14. Сизигийный и квадратурный приливы

Об этом факте давно знали моряки: если корабль случайно садится на мель и его не удастся снять, тогда необходимо ждать либо полнолуния, либо новолуния. Тогда высокий прилив (поднятие воды) позволит кораблю сняться с мели.

В некоторых местах Земли приливы достигают большой амплитуды. В открытом океане амплитуды небольшие: колебания открытой океанской воды имеют амплитуду чуть меньше метра. Эта выпуклость в метр набегают с большой скоростью на побережья континента. На экваторе Земля движется со скоростью 500 м/с, а побережье Канады движется со скоростью 200 м/с.

Примеры приливов и отливов показаны на рисунках 16.15 и 16.16.



Рис. 16.15. Отлив и прилив в заливе Фанди (Канада)



Рис. 16.16. Приливы и отливы на побережьях Франции

Приливы на спутниках планет

Приливы бывают не только на Земле, а на любых космических телах. Например, приливы существуют на спутниках больших планет: Юпитер и его спутнике Ио (рис. 16.17). Для Ио приливная сила – это определяющее физическое явление.

На круговой орбите спутник не изменяет свою форму, а лишь поворачивается. Кроме Ио, есть еще более удаленных спутников у Юпитера, которые возмущают движение Ио, т.е. немного меняют параметры орбиты своим притяжением. Поэтому Ио движется по эллиптической орбите (рис. 16.18). Это приближение вызывает более сильную приливную деформацию, а когда спутник удаляется – приливная сила ослабевает. Тело спутника все время испытывает изменения формы – деформации, которые приводят к выделению тепла.



Рис. 16.17. Приливы на Ио

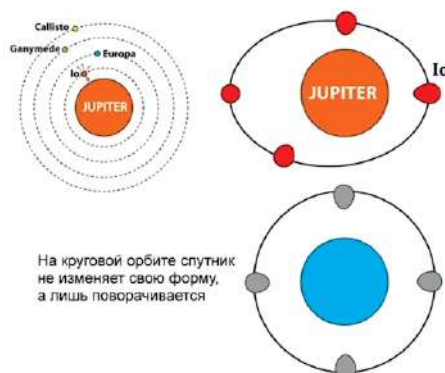


Рис. 16.18. Проявление приливных сил на Ио

Высота приливного горба у Ио около 10 км. Заметный эксцентриситет орбиты Ио ($e = 0,0041$) вызывает "дыхание" приливного горба примерно на 100 метров. Эксцентриситет орбиты Ио поддерживается влиянием его соседей (Европы и Ганимеда), поскольку они движутся в резонансе 1:2:4.

У Луны высота приливного горба около 25 м, поэтому, несмотря на большой эксцентриситет орбиты ($e = 0,055$), "дыхание" приливного горба всего 3 метра

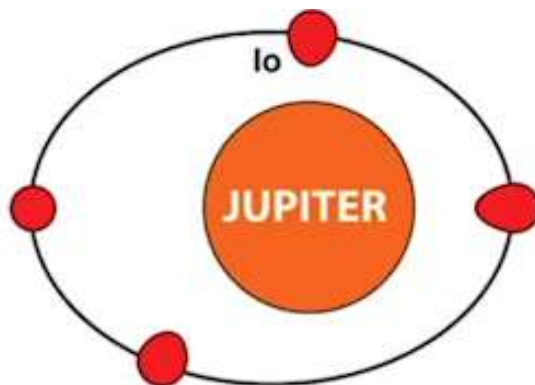


Рис. 16.19. Орбита Ио.

На рисунках 16.20 и 16.21 показано моделирование приливных деформаций.



Рис. 16.20. Приливные деформации

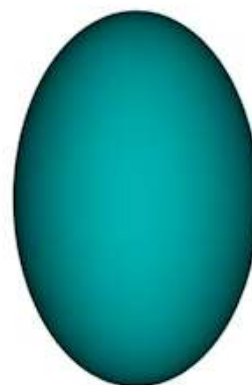


Рис. 16.21. Приливные деформации

Именно поэтому, вся поверхность спутника покрыта мощными вулканами (рис. 16.22). Это значит, что внутри он полностью расплавленный. Почти каждая черная точка на снимке – это жерло вулкана.

Приливы со стороны Луны и Солнца не так сильно деформируют Землю. Однако, геологи заметили, что землетрясения и извержения вулканов слабо коррелируют с приливным влиянием Луны.

Взаимное приливное влияние и Земля оказывает на Луну, т.е. на Луне должны происходить еще более сильные приливы. Действительно, когда на Луну были доставлены сейсмографы, регистрирующие колебания лунной почвы, оказалось, что приливное влияние Земли заметно деформирует Луну.

Существуют и другие эффекты, которые заметны на нашей планете. Землю, сжатую вдоль полярной оси в результате суточного вращения, можно представить как сферическое тело, окружённое экваториальным «вздутием» (рис. 16.23). Экваториальные вздутия, толщиной 20 км, притягиваются к Луне с разной силой и в разном направлении. Эти силы не компенсируются, поэтому Луна пытается повернуть ось вращения Земли.

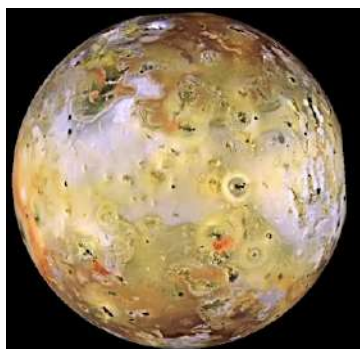


Рис. 16.22. Приливы на спутнике Ио

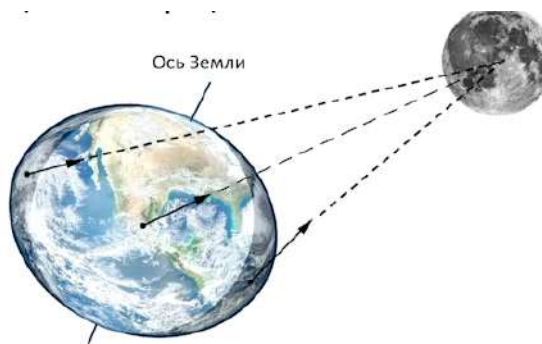


Рис. 16.23. Прецессия оси вращения

Этот эффект часто наблюдается в детстве, если раскручивать волчок юлы. Термин *прецессии* родился в астрономии. Главное его свойство – это быстро вращаться вокруг

собственной оси – это основной момент импульса. Со стороны Земли на волчок действует сила притяжения, которая хочет положить волчок на пол – это второй момент импульса, который прибавляется к основному. Получается конусообразное движение основного момента импульса, т.е. основной оси волчка.



Рис. 16.24. Прецессия оси вращения

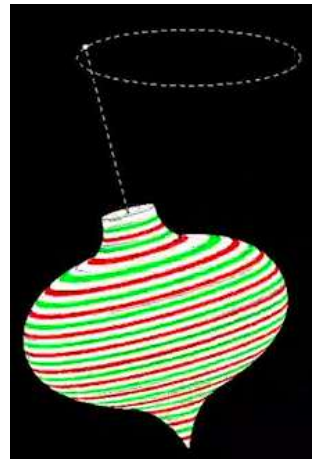


Рис. 16.25. Прецессия оси вращения

Аналогично волчку, то же самое происходит и с Землей под действием притяжения к Луне. У Земли есть собственный момент импульса – суточное вращение. Этот момент импульса из-за влияния Луны и частично Солнца испытывает конусообразное движение.

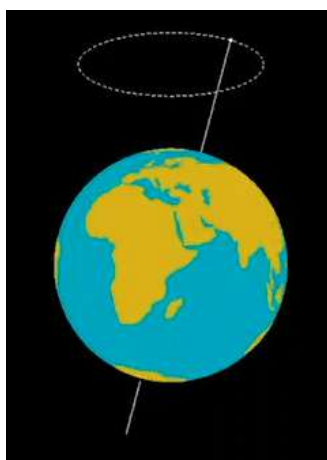


Рис. 16.26. Прецессия оси вращения
Земли

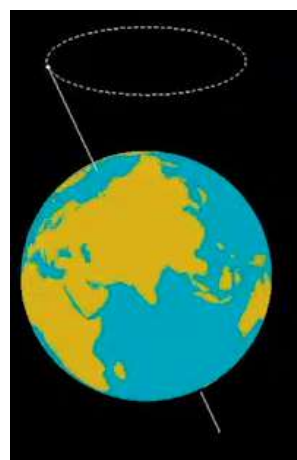


Рис. 16.27. Прецессия оси вращения
Земли

Термин *прецессия* связан с тем, что равноденствие происходит, когда Солнце происходит небесный экватор. За счет прецессии земной оси меняется и плоскость экватора. Точка его пересечения с земной орбитой меняется. Солнце на небе, двигаясь по эклиптике, встречается с этой точкой раньше, т.е. наступает равноденствие, чем если бы этого движения не было.

Таким образом, ось вращения Земли испытывает конусообразное движение (рис. 16.28) вокруг линии, перпендикулярной к плоскости орбиты Земли и Луны. Наклон земной оси сохраняется. Но ориентация земной оси с периодом примерно в 26 000 лет испытывает конусообразное движение.

В настоящее время ось направлена на полярную звезду. Значит 13 000 лет назад ось вращения Земли смотрела почти точно на яркую звезду *Vega*.

Сегодня полярная звезда служит ориентиром на направление в северную часть горизонта. Но полярная звезда не очень яркая, и иногда ее очень трудно заметить. 13 000 лет назад полярной служила *Vega*. А *Vega* – это одна из ярчайших звезд на северном небе. Вероятно, древние охотники ориентировались по яркой Веге. Таким образом, через 13 000 лет *Vega* вернется в свою роль.



Рис. 16.28. Прецессия оси вращения Земли

Урок 17. Планеты Солнечной системы

Вторая часть курса (уроки 17 – 32) посвящены конкретным объектам нашей Вселенной (рис. 17.1).

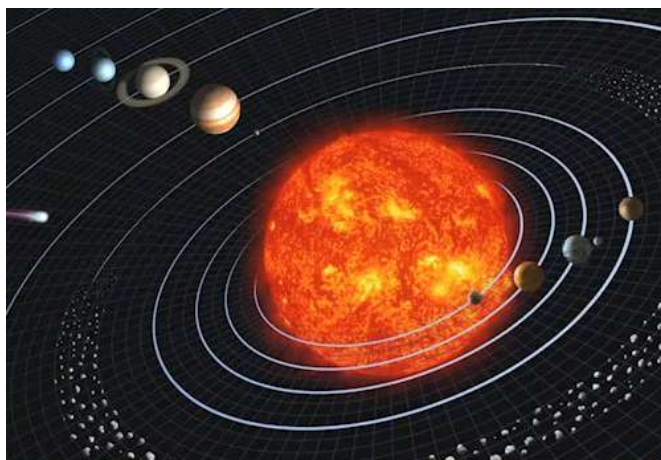


Рис. 17.1. Планеты Солнечной системы

17.1. Солнечная система: обзор и основные методы изучения

Номенклатура.

Наша Солнечная система состоит из звезд, планет и т.д. Сегодня принята следующая номенклатура (система названий):

- звезда Солнце;
- планеты;
- спутники планет;
- карликовые планеты;
- малые тела Солнечной системы.

Нет полной уверенности, что в Солнечной системе нет других крупных тел. Может быть они есть, но пока не обнаружены.



Рис. 17.2. Планеты Солнечной системы

Солнечная система

Рисунок 17.2 является лишь иллюстрацией планет в нашей Солнечной системе, а рисунок 17.3 является наиболее важным, так как на нем отражены тела Солнечной системы в едином масштабе. Рассмотрим, во сколько раз по размеру и трудно представить во сколько раз по массе Солнце больше любой планеты нашей Солнечной

системы. Например, Юпитер по своей массе составляет 0,001 долю от Солнца, а все остальные планеты еще меньше. Владимир Георгиевич Сурдин специально обозначил стрелкой Землю, иначе найти ее было бы сложно. Рядом с Землей находятся планеты земного типа: Меркурий, Венера и Марс. На рисунке Меркурий и вовсе не видно – это точка в сравнении с Солнцем.

На больших планетах Солнечная система не заканчивается. Иллюстрация на рисунке 17.4 сделана не в одном масштабе. Шкала расстояния от Солнца – логарифмическая, т.е. каждый следующий этап в 10 раз длиннее предыдущего. 1 астрономическая единица – это приблизительно орбита Земли, 10 а.е. – орбита Юпитера и т.д. Все это – Солнечная система, а более 100 000 а.е. – это «владения» других систем. До 150 000 а.е. доминирует гравитация Солнца.

У ученых нет уверенности, что мелкие тела на границе расположены шарообразно – условно эта область называется *Облаком Оорта*. Ян Хендрик Оорт – голландский астроном, который предсказал, что эта область существует и что в ней существует мелкие объекты ледяного типа, подобные кометам.

Пояс Койпера – это область близкая к орбитам больших планет.

Пояс Хилса – переходная область от сферического облака Оорта к плоскому поясу Койпера.

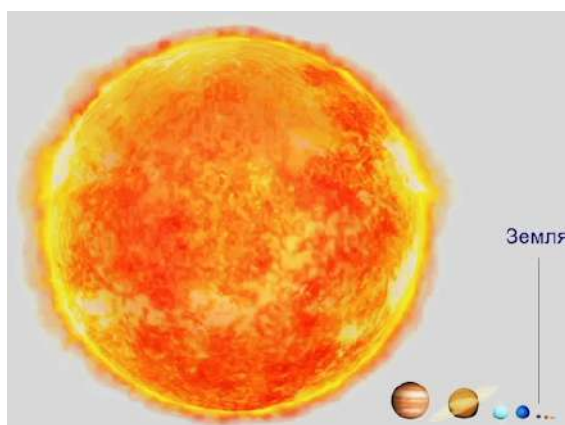


Рис. 17.3. Тела Солнечной системы в едином масштабе

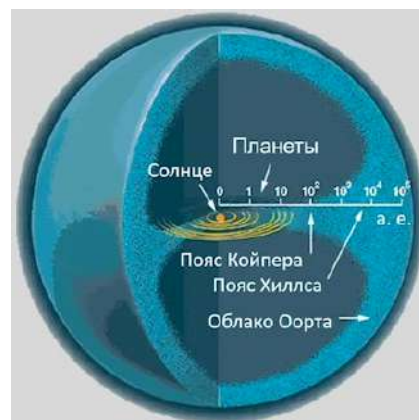


Рис. 17.4. Солнечная система как целое

Наземные наблюдения Солнечной системы

Площадь небесной сферы 41 253 квадратных градуса. Планеты изучаются прежде всего телескопами. Возможности их чрезвычайно ограничены. Большие телескопы имеют маленькое поле зрения, и они не в состоянии охватить все небо и изучить всю Солнечную систему. Существуют телескопы с более широким полем зрения, но их возможности ограничены.

Для поиска новых объектов используют телескопы скромного размера с большим полем зрения (рис. 17.7). При невысокой цене они имеют высокую светочувствительность и работают в автоматическом режиме



Рис. 17.5. Наземная обсерватория



Рис. 17.6. Поле зрения телескопов



Рис. 17.7. Телескопы-роботы

Статистика Солнечной системы

На рисунке 17.8 показано количество объектов, обнаруженных к указанному году (рис. 17.8). Кривая показывает сколько объектов в Солнечной системе было обнаружено в том или ином году. Пунктирная (средняя) кривая показывает, какие из новых объектов подробно исследованы. Нижняя кривая показывает количество объектов, получивших собственные имена.



Рис. 17.8. Статистика Солнечной системы

Вопрос о наименовании нового объекта рассматривает международная астрономическая комиссия.

Такая статистика ведется вплоть до наших дней. Около 150 – 200 новых объектов ежедневно открывают астрономы. В большинстве своем это астероиды и кометы. Номер присваивается после точного определения орбиты. К 2021 году открыто чуть более 1 миллиона астероидов и ядер комет.

Обнаружение новых тел Солнечной системы

Прежде всего, астрономы обращают внимание на спутники планет. У Меркурия и Венеры спутников нет.

На рисунках 17.9 показана статистика на момент 1980 года. В те времена астрономы еще работали с фотопластинок и глазом исследовали небо. На тот момент было известно 45 спутников.

В настоящее время (рис. 17.10) у Земли только один спутник, у Марса – два (Фобос и Деймос), а всего известно 218 спутников, открытых с помощью телескопов-роботов.

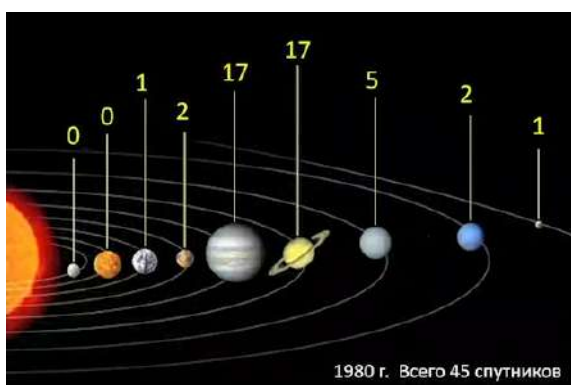


Рис. 17.9. Известные спутники планет к 1980 году

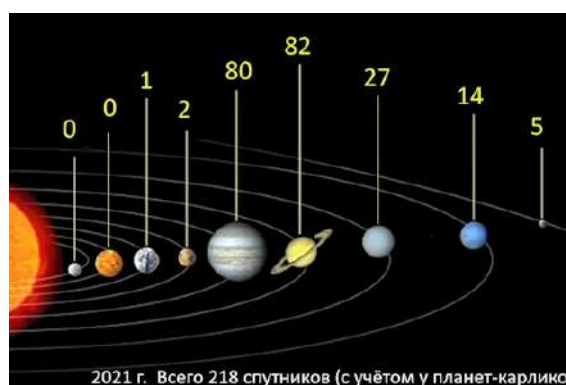


Рис. 17.10. Известные спутники планет к 2021 году

На рисунке 17.11 показана статистика обнаружения спутников.



Рис. 17.11. Количество известных спутников планет

Первые спутники у других были открыты Галилео Галилеем с помощью его первого телескопа.

Выявление мелких деталей на планетах.

Возможности наземных телескопов все еще довольно низкие. Важным параметром является угловое разрешение: размер наиболее мелких деталей, различимых на поверхности планет при наблюдении с Земли с угловым разрешением 1". Дело в том, что колебания воздуха размывают то изображение, которое получает телескоп. Поэтому, когда астрономы наблюдают за поверхностями соседних планет, они не могут заметить мелких деталей – изображение не очень резкое, плывущее. Даже на поверхности Луны астрономы могут различить детали не менее 2 км; на поверхности Марса видны детали крупнее 270 км, на Юпитере – крупнее 3000 км, а на Плуtone – крупнее 28 000 км. Учитывая то, что сам Плутон имеет диаметр около 3000 км, становится понятно, что на поверхности Плутона в наземный телескоп невозможно увидеть ни одной детали, сам Плутон кажется нам точкой.

Таблица 17.1. Выявление мелких деталей на планетах

Луна	2 км
Марс	270 км
Юпитер	3000 км
Плутон	28 000 км

Межпланетные и орбитальные зонды.

В последние десятилетия появилась возможность запускать к планетам космические зонды.

New Horizons (NASA) запущен 19 января 2006 г. прошел Юпитер 28 февраля 2007 г. 2015 и сблизился с Плутоном 14 июля 2015 года.

Первое в истории отождествленное изображение Плутона (отмечено стрелкой) показано на рисунке 17.13. Изображение было получено Клайдом Томбо в обсерватории Лоуэлла, 1930 г.



Рис. 17.12. New Horizons (NASA)



Рис. 17.13. Изображение Плутона (отмечено стрелкой)

Лучшие изображения Плутона и его крупнейшего спутника Харона, полученные в начале XXI века с помощью телескопов показаны на рисунках 17.14 и 17.15.

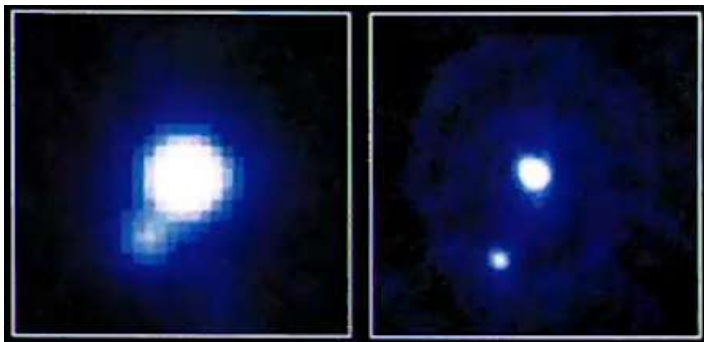


Рис. 17.14. Снимки с наземного телескопа (слева) и космического телескопа «Хаббл» (справа)



Рис. 17.15. Плутон, New Horizons, NASA, 2015

Венеру, подобно Плутону, тяжело изучить. Планета покрыта плотной атмосферой.

Венера изучена, благодаря тому что к ней подлетели космические аппараты с радиолокаторами: сначала два советских аппарата «Венера-15» и «Венера-16», затем американский аппарат «Магеллан». Этими аппаратами сквозь облачную атмосферу был прозондирован верхний слой.

На рисунке 17.16 показана радиокарта Венеры – цветами показан уровень (высота): голубым цветом показаны низменности, зеленовато-желтым – возвышенности, красным и белым – самые высокие точки на поверхности Венеры. Белая структура на Венере – это горы Максвелла. Название горы получили в честь Джеймса Клерка Максвелла – отца теории радиоволн и теории электромагнитного поля. Так как карта была получена благодаря радиоволнам, горы получили название в честь великого ученого. Все остальные географические названия женского рода.

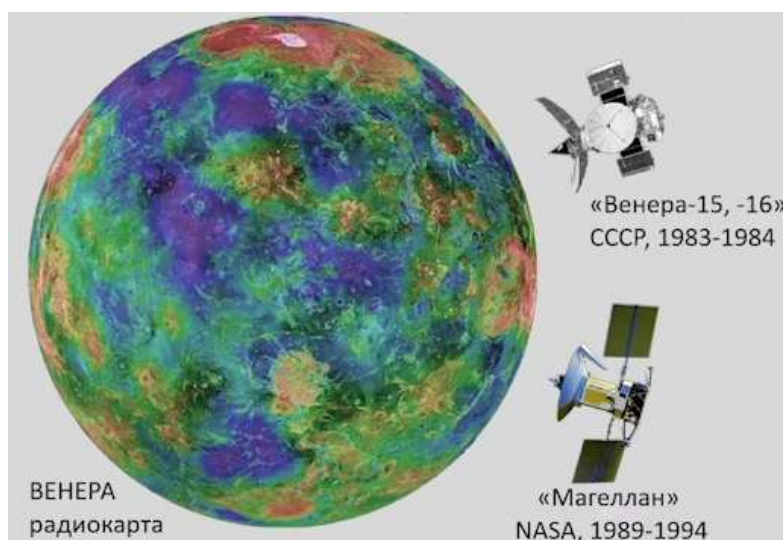


Рис. 17.16. Радиокарта Венеры

Роботы на поверхности планет

На поверхность Венеры садились космические аппараты, однако они работали там недолго, так как там очень высокая температура – вся техника выходила из строя.

На рисунке 17.18 показан робот, высаженный на поверхность Марса. В 1971 году советский аппарат «Марс-3» первым опустился на поверхность Марса. После этого до последних лет американские инженеры запускают на Марс стационарные и передвигающиеся аппараты – марсоходы.

Полет к малым телам Солнечной системы – очень важное и сложное дело. В последние годы этим делом занимаются инженеры Японии, США и Европы. Первый удачный полет к одному из астероидов совершил зонд «Хаябуса» (рис. 17.19) в 2005 году. Зонд «Хаябуса» только приблизился к астероиду, но посадку не совершал. Однако ему удалось взять небольшой образец в специальную капсулу. Затем, пролетая мимо Земли, этот образец был сброшен на парашюте. Так, ученые впервые получили образцы вещества с поверхности астероида.



Рис. 17.18. Робот на поверхности Марса



Рис. 17.19. Зонд «Хаябуса» (Япония) у астероида Итокава, 2005 г.

Пилотируемые межпланетные экспедиции

Люди успели побывать на космических телах, но этим телом была только Луна (рис. 17.20, рис. 17.21).

С 1969 года по 1972 год на поверхность Луны опускались 6 экспедиций в рамках проекта «Аполлон» («Apollo»). 12 американских астронавтов работали на поверхности Луны: делали исследования поверхности Луны, собирали образцы, оставляли приборы, которые должны были работать после их возвращения на Землю.

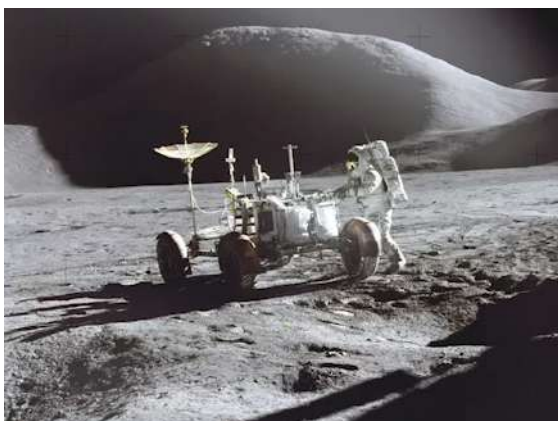


Рис. 17.20. Экспедиция на Луну



Рис. 17.21. Экспедиция на Луну

Это были полезные экспедиции, однако человек уже давно не возвращался на поверхность Луны.

Даже на Луне человеку работать трудно, ведь там нет атмосферы, поэтому приходится использовать скафандр. На Земле скафандр весит около 100 кг, но на Луне сила тяжести в 6 раз ниже земной, поэтому скафандр весил около 16 кг.

17.2. Солнечная система: основные группы объектов и их характеристика

Вся Солнечная система иногда бывает изображена на таких картинках, как рисунок 17.22. Такое изображение планет и объектов Солнечной системы – неверное, так как они находятся не в масштабе.

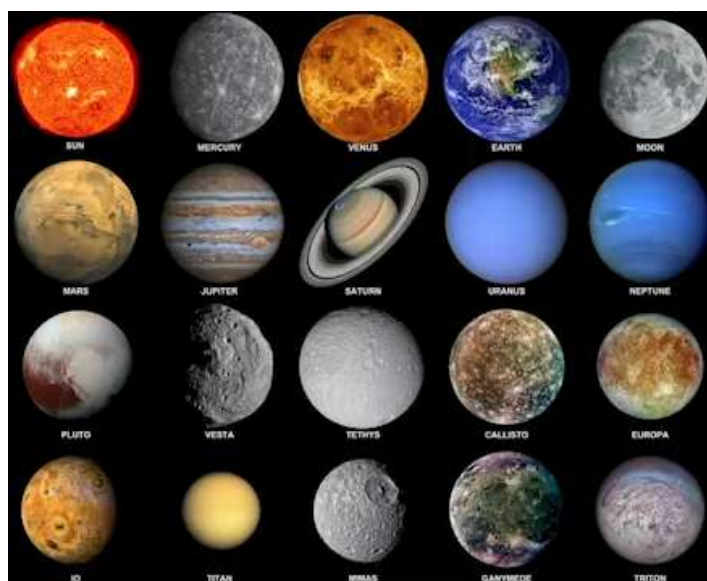


Рис. 17.22. Солнечная система не в масштабе

Изображение в учебниках часто может вводить в заблуждение. Так, например, если открыть учебник по биологии, то на странице одинакового размера будут изображены разные животные (рис. 17.23, рис. 17.24): слон и водомерка. Сравним их:

водомерка бегает по поверхности воды и не проваливается, в то время как слон не сможет пробежать по воде.

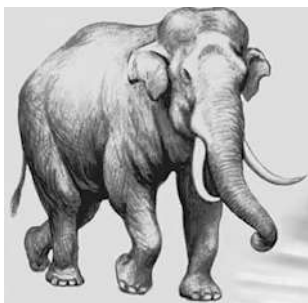


Рис. 17.23. Изображение слона



Рис. 17.24. Изображение водомерки

Это показывает то, что масса определяет физические свойства. Отсутствие единого масштаба затрудняет адекватное восприятие.

На рисунке 17.25 показано представление Солнечной системы.



Рис. 17.25. Солнечная система

Различие между звездой и планетой в массе.

Номенклатура Солнечной системы.

- Солнце;
- планеты (большие планеты, классические планеты)
- планеты-карлики;
- спутники планет;
- Малые тела Солнечной системы (астероиды, кометы).

А также: межпланетная пыль, метеороиды, межпланетный газ, излучение, магнитное поле, космические аппараты.

99,86% массы Солнечной системы заключено в Солнце.

99,5% общей массы планет заключено в планетах-гигантах.

71% общей массы планет-гигантов заключено в Юпитере.

Почти весь момент импульса Солнечной системы заключен в орбитальном движении Юпитера и Сатурна.

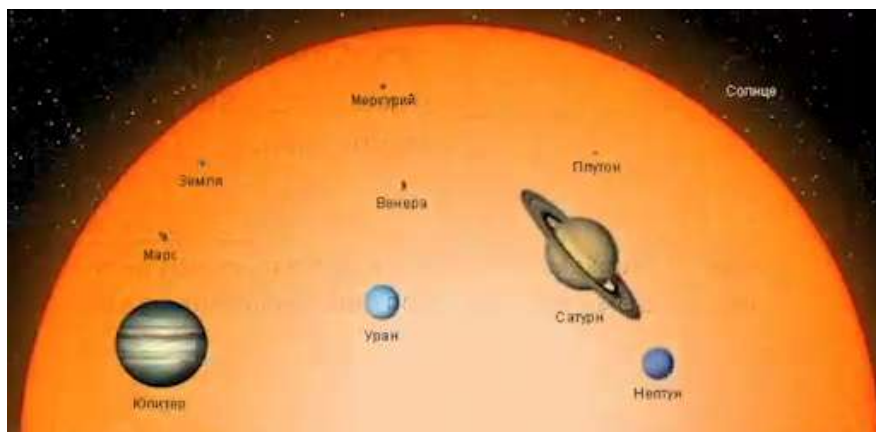


Рис. 17.26. Масштабы Солнца

На рисунке 17.27 показано разнообразие планет в Солнечной системе. Изображение хорошо отражает удивительную симметрию: 4 планеты – гиганта (два ледяных и два газовых) и 4 небольших планеты земного типа. Планеты земного типа также можно разделить на две группы: планеты, похожие на Землю (Венера и Земля) и планеты, не похожие на Землю из-за отсутствия атмосферы (Марс и Меркурий).



Рис. 17.27. Разнообразие планет

Отличие планет и планет-карликов

Отличие планет-карликов от больших планет заключается в том, что у больших планет орбиты не пересекаются и лежат в одной плоскости (рис. 17.28). У планет-карликов орбиты (рис. 17.29) пересекаются и хаотично наклонены.



Рис. 17.28. Планеты Солнечной системы

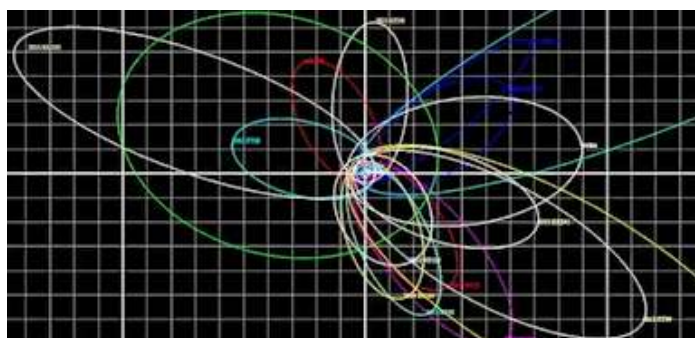


Рис. 17.29. Орбиты планет-карликов

Один из спутников Сатурна – Гиперион (рис. 17.31) имеет не шарообразную форму, т.к. он мал по размеру, сила тяготения не может преодолеть жесткость его тела.

Планета-карлик Плутон называется планетой, потому что гравитация преодолела жесткость вещества в недрах тела и округлила его, а значит внутри происходят геологические процессы.



Рис. 17.30. Планета-карлик Плутон,
диаметр 2377 км



Рис. 17.31. Спутник Сатурна Гиперион,
длина 360 км

Планеты-карлики настолько маленькие, что иногда какой-нибудь спутник планеты по массе и размеру превосходит массу и размер планеты-карлика. На рисунке 17.32 показана диаграмма, на которой видно, что масса Луны превосходит суммарно массу всех планет-карликов. Сегодня известно пять карликовых планет: Плутон, Церера, Харон, Хаумеа, Макемаке и Эрида.

Планеты-спутники

Крупнейшие спутники планет, в том числе Луна, по внутреннему устройству аналогичны планетам (рис. 17.33), однако они находятся рядом с еще более массивным телом, поэтому их называют спутниками.

Крупные спутники принципиально ничем не отличаются от планет. Можно сказать, что, например, Титан, имея атмосферу, является планетой больше, нежели Меркурий, который атмосферы не имеет.

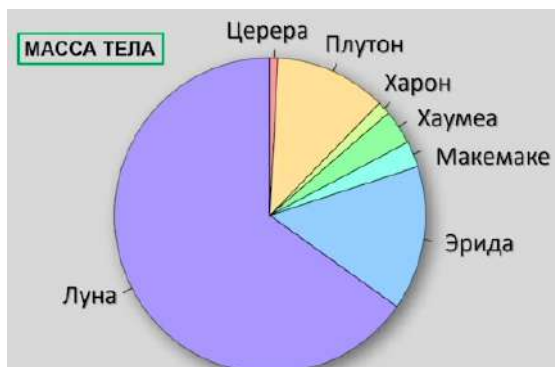


Рис. 17.32. Масса тела спутников



Рис. 17.33. Меркурий, Луна и Титан в едином масштабе

Иногда тяжело понять, какое тело является спутником. Например, Плутон имеет 5 спутников (рис. 17.34). Харон – наиболее крупный спутник Плутона, однако оба эти объекта обращаются вокруг общего центра масс. Плутон в 8 раз массивнее Харона, поэтому принято считать, что Харон – это спутник.

Рядом с каждой планетой можно выделить крупные спутники, которые претендуют на звания планет.



Рис. 17.34. Спутники Плутона



Рис. 17.35. Крупные спутники планет

Ученые в ближайшее время хотят выделить новый класс объектов: «планеты-спутники» (рис. 17.36).



Рис. 17.36. Планеты-спутники

Различие комет и астероидов

Астероиды и ядра комет принципиально ничем друг от друга не отличаются. Астероиды – каменные объекты, там меньше летучих веществ (воды и др.), а в ядрах комет – больше летучих веществ.

Кометы находятся дальше от Солнца, не так сильно нагреваются и испаряются. Астероиды находятся ближе к Солнцу, которое их подсушило, поэтому они плотнее.

У астероида Итокава (рис. 17.38) средняя плотность 2 г/см^3 . У ядра кометы Чурюмов-Герасименко средняя плотность: 0.5 г/см^3

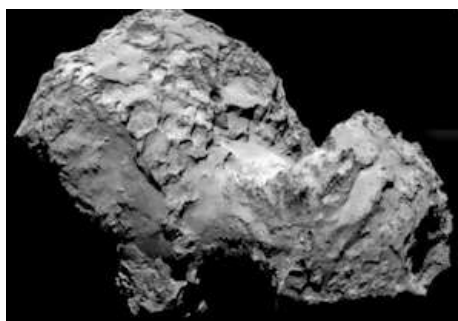


Рис. 17.37. Ядро кометы 67P/Чурюмов-Герасименко. Плотность: 0.5 г/см^3



Рис. 17.38. Астероид 25143 Итокава. Плотность: 2 г/см^3

17.3. Происхождение и эволюция планетарных систем

Звезды и планеты формируются за счет силы тяжести из разреженного межзвездного вещества (рис. 17.40).



Рис. 17.39. Галактика Млечный путь



Рис. 17.40. Формирование
межзвездного вещества

Вещество постепенно стягивается в плотные облака, непрозрачные для света (рис. 17.41).



Рис. 17.41. Плотные облака
межзвездного вещества



Рис. 17.42. Эволюция планетарных
систем

В недрах плотных облаков большая часть вещества сжимается в звезду (рис. 17.43), а остатки вещества продолжают движение вокруг гравитационного центра и постепенно складываются в планеты, спутники и межпланетное вещество.

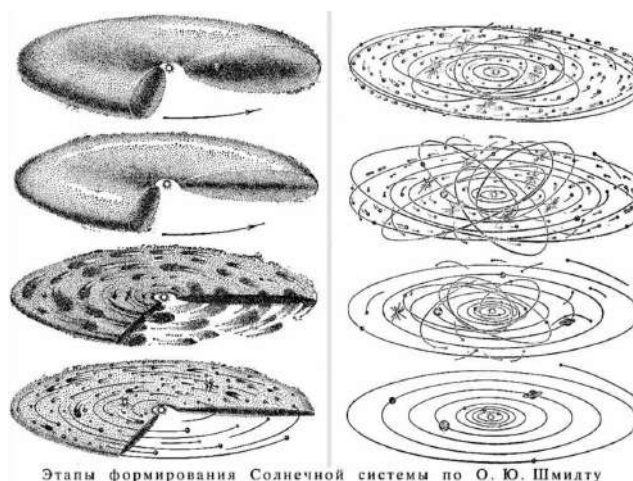


Рис. 17.43. Этапы формирования Солнечной системы по О.Ю. Шмидту

Раньше ученые могли только теоретически представить процесс формирования Солнечной системы (рис. 17.42). Однако, были созданы телескопы микроволнового диапазона. В настоящее время космический телескоп ALMA показывает изображение формирующихся протопланетных дисков.

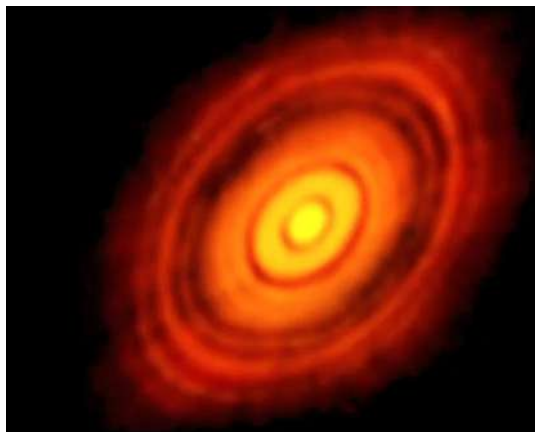


Рис. 17.44. Изображение формирующихся протопланетных дисков (ALMA)

Литература

Рекомендации:

- Астрономия и астрофизика. Небо и телескоп. Автор: В.Г. Сурдин.
- Астрономия и астрофизика. Солнечная система. Автор: В.Г. Сурдин.

Урок 18. Экзопланеты и поиск жизни во Вселенной

Солнечная система изучена далеко не полностью. Каждую ночь астрономы в среднем открывают сотню новых объектов. Как правило, это происходит с помощью телескопов-роботов.

Вероятно, больших новых тел в Солнечной системе, мы уже не обнаружим. Однако в последние 20 лет, ученые стали активно искать и изучать о планетных системах иных звезд. Такие планеты называются *экзопланетами*, т.е. внешними планетами по отношению к нашей Солнечной системе.

Жизнь – это уникальное явление. В настоящее время открыто множество космических тел, миллионы звезд и около 5 тысяч экзопланетных объектов, но признаков жизни пока нигде не найдено.

18.1. Экзопланеты. Методы поиска планетных систем у других звезд

Поиск планет за пределом Солнечной системы

Высокая яркость звёзд мешает поиску рядом с ними планет. Аналогично тому, как светит маяк (рис. 18.2), светят и звезды. За своим светом они могут закрывать другие объекты, но об их наличии там можно лишь только предполагать.

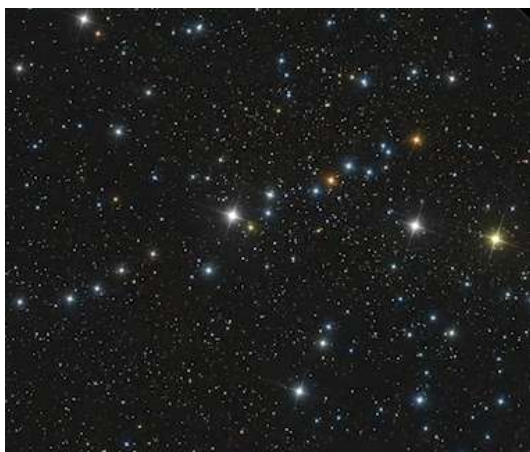


Рис. 18.1. Высокая яркость звезд



Рис. 18.2. Маяк

Экзопланета (внесолнечная планета) – планета за пределом Солнечной системы.

Известно, что планета и ее звезда обращаются по орбитам вокруг общего центра масс: у планеты большая орбита, у звезды – маленькая. Если не удаётся увидеть планету, нужно следить за звездой, движение которой вокруг общего с планетой центра масс может выдать присутствие планеты и даже позволит определить её параметры: массу и период оборота. Эта идея появилась у астрономов давно, и они стали изучать ближайшие звезды.



Рис. 18.3. Орбитальное движение планеты и звезды

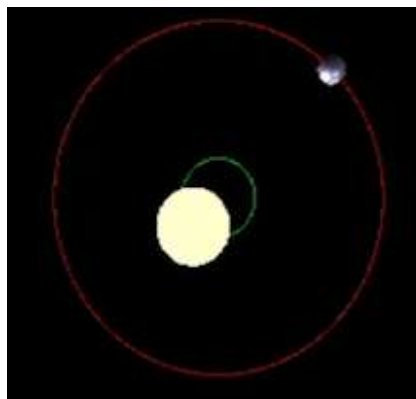


Рис. 18.4. Орбитальное движение планеты и звезды

В 1844 году Фридрих Бессель предположил, что Сириус является двойной звездой. Он первым обнаружил колебания *Сириуса*, что навело его на мысль, что рядом с *Сириусом* есть еще какой-то невидимый объект. В 1862 году Альван Кларк подтвердил это обнаружив звезду-компаньона.



Рис. 18.5. Звезда Сириус (оптика)

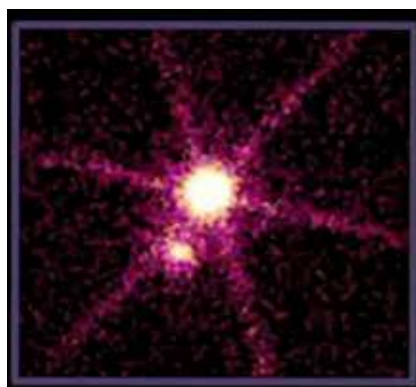


Рис. 18.6. Звезда Сириус (рентген)

На рисунке 18.7 показана яркая траектория – траектория *Сириуса*, который колеблется по отношению к другим звездам, т.е. движется волнообразно. Бессель даже предсказал, как именно будет двигаться объект.

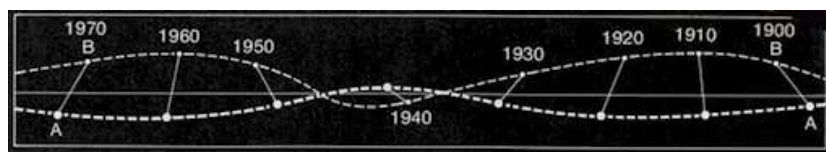


Рис. 18.7. Движение компонентов системы Сириус относительно их центра масс

Позже объект рядом с *Сириусом* был обнаружен. Телескопы второй половины 19 века были достаточно мощные, чтобы заметить небольшое слабосветящееся тело.

Спутник *Сириуса* оказался удивительным телом нового типа. Сегодня такие объекты называются *белыми карликами*. Белые карлики очень массивные, поэтому амплитуда нового тела и амплитуда *Сириуса* были близки друг к другу. В

рентгеновском диапазоне белые карлики светятся ярче, чем массивная звезда (рис. 18.6).

В настоящее время с помощью телескопа «Хаббл» была получена фотография белого карлика возле Сириуса. Траектория их движения прослеживается до сих пор (рис. 18.9).



Рис. 18.8. Фотография
белого карлика,
полученная телескопом
«Хаббл»



Рис. 18.9. Траектория движения Сириуса А и Сириуса В
до последних лет

Такая же идея пыталась реализоваться и относительно планет, но это было непросто. В таблице 18.1 показана Солнечная система так, как если бы наблюдали ее от соседней звезды α Сеп: планеты, освещенные Солнцем, имеют очень слабый блеск; далекие планеты практически не различимы. Однако, например 22 и 23 звездная величина вполне доступна для изучения современными телескопами. Однако их угловое расстояние от Солнца – очень маленькое (доли секунд)

Таблица 18.1. Солнечная система при наблюдении от α Сеп

	Угловое расстояние от Солнца	Блеск
Меркурий	0,3''	27 ^m
Венера	0,5	24
Земля	0,8	25
Марс	1,1	27
Юпитер	3,9	22
Сатурн	7,2	23
Уран	14	27
Нептун	23	27
Плутон	30	34

При этом само Солнце имеет видимый блеск 0,5^m.

Для примера рассмотрим 4 фотографии одной и той же области неба, сделанных с разными экспозициями (рис. 18.10):

- Короткая экспозиция (верхний левый рисунок) – видна только яркая звезда, слабосветящихся тел нет.

- При длительных экспозициях появляются все более и более слабые звезды на фотографиях. При этом яркая звезда своим рассеянным светом, который рассеивается и в атмосфере Земли, и внутри оптики телескопа, заливают всю окрестность.

Таким образом, необходимо было решать эту проблему.

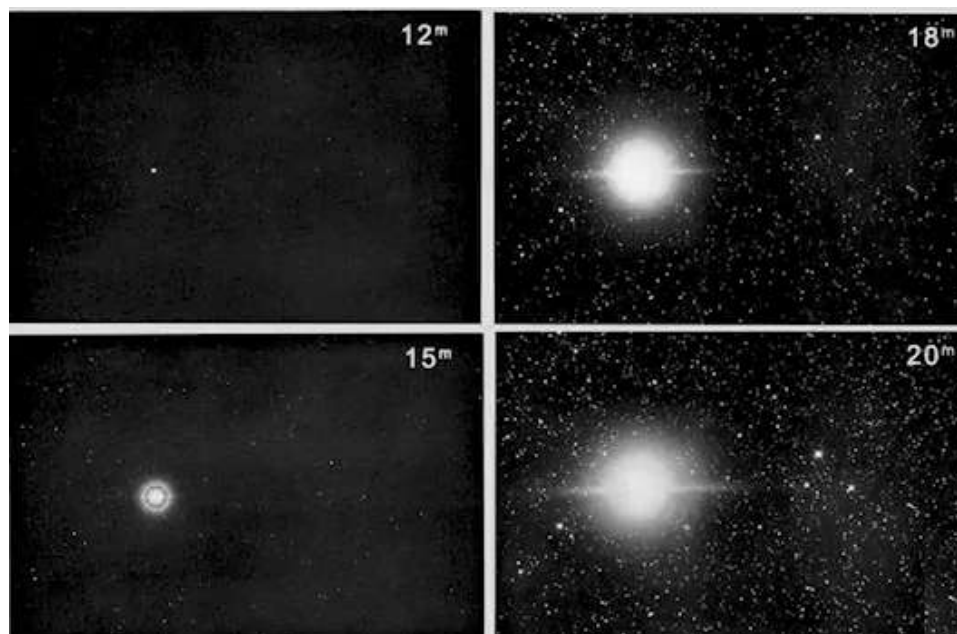


Рис. 18.10. Участок неба в созвездии Возничий, полученный в обсерватории Маунт-Вилсон с разными экспозициями (в поле снимка указана предельная звездная величина)

Для решения проблемы астрономы решили попробовать заметить волнообразное движение звезд, связанное с присутствием массивной планеты на орбите рядом с этой звездой. Однако это очень сложно.

В случае нашей Солнечной системы, если смотреть на Солнце (рис. 18.11) с соседних звезд, то оно под действием притяжения, в основном, к Юпитеру немного колебалось бы с периодом 12 лет, но амплитуда этих колебаний была бы около $0,001''$ – крайне малый угол.

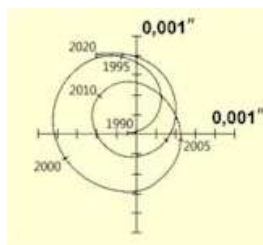


Рис. 18.11. Угловое движение Солнца

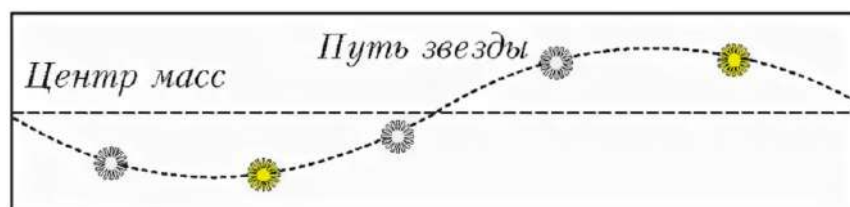


Рис. 18.12. Траектория движения звезды

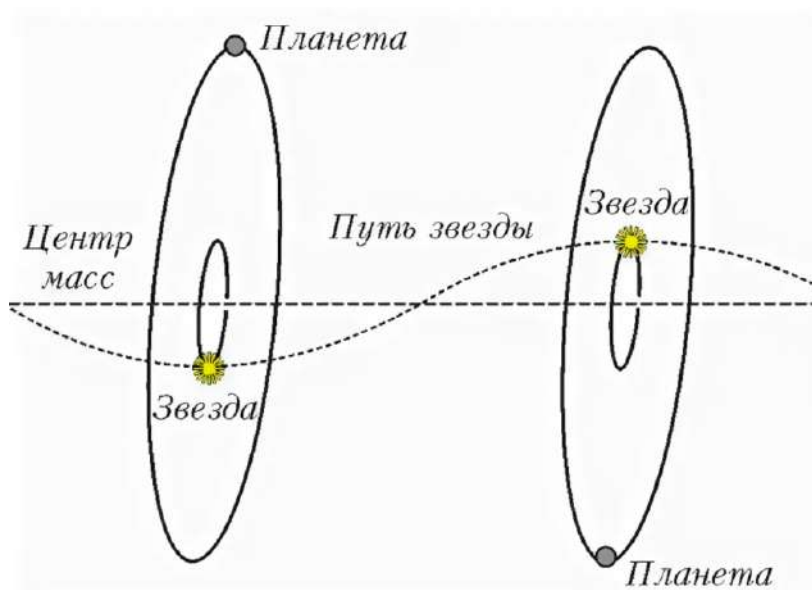


Рис. 18.13. Траектория движения звезды

Первым эту задачу начал решать американский астрометрист Питер ван де Камп.

Комментарий: астрометрист – специалист по точному измерению положения небесных объектов.

В качестве звезды для измерения Питер ван де Камп выбрал летящую звезду Барнарда.

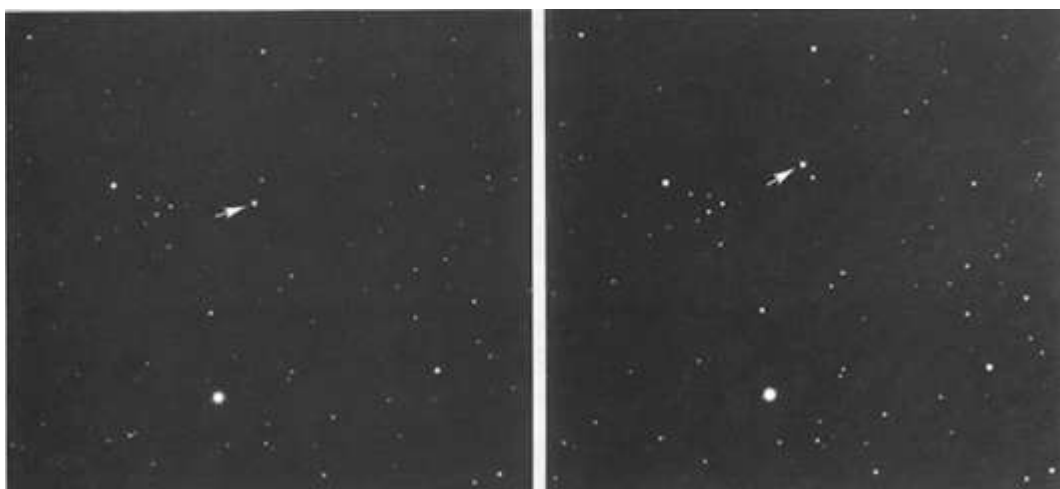


Рис. 18.14. Перемещение Летящей Звезды Барнарда за 10 лет

Питер ван де Камп использовал длиннофокусный рефрактор (рис. 18.15), который дает большое изображение на своем фокусе. С 1937 по 1960 г. он наблюдал Звезду Барнарда и заключил, что у нее есть планета или даже несколько с массами близкими к массе Юпитера.

Это объявление было воспринято с энтузиазмом. Однако, более качественные наблюдения не подтвердили наличие планет у звезды Барнарда.



Рис. 18.15. Питер ван де Камп у 24-дюйм рефрактора обсерватории Спрул (США)



Рис. 18.16. 61-дюймовый астрометрический рефлектор Морской обсерватории близ Флагстаффа (Аризона)

Сплошная линия на графике (рис. 18.17) показывает, как двигалась бы звезда по данным ван де Кампа. Но никакого колебательного движения около звезды Барнарда обнаружено не было. Все колебания, заключенные де Кампом были связаны с изогнутостью телескопа, изменением температуры воздуха в течение периодов года.

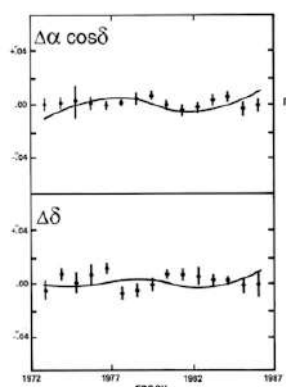


Рис. 18.17. Отклонения собственного движения Звезды Барнарда от прямолинейного по данным Морской обсерватории США за 1972-1986 гг. (точки)

В настоящее время было выяснено, что у звезды Барнарда все же есть небольшой спутник планетного типа.

В нашу эпоху появились космические телескопы лучшего качества. Вершиной астрометрии считается европейский космический телескоп *Gaia*.

Gaia запущен в декабре 2013 г. в точку Лагранжа *L2* системы Солнце-Земля. Астрометрический спутник *Gaia* (ESA) должен измерить положение и движение звезд ярче 15 звездной величины с точностью до $0,00002''$.

Это откроет перспективу астрометрическому методу поиска экзопланет (который пока себя почти не проявил).

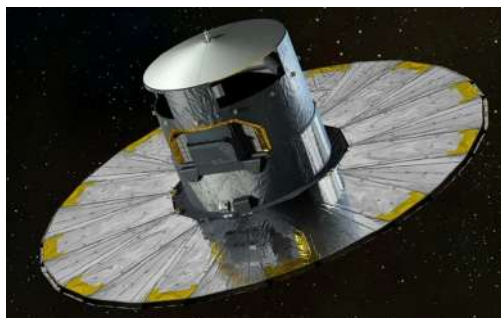


Рис. 18.18. Космический телескоп GAIA



Рис. 18.19. Космический телескоп GAIA

Доплеровское смещение линий в спектре звезды

В конце 20 века (1994-1995 годы) астрономы решили использовать другой метод, который позволил бы им обнаружить присутствие невидимых планет вокруг ярко светящихся звезд. Звезды движутся не только в плоскости неба, но и вдоль луча наблюдателя.

Доплеровский метод поиска экзопланет

Если измерять положение спектральных линий в спектре звезды, то за счет эффекта Доплера из-за движения звезды вокруг общего центра масс с планетой, в спектре звезды должны регулярно смещаться спектральные линии.

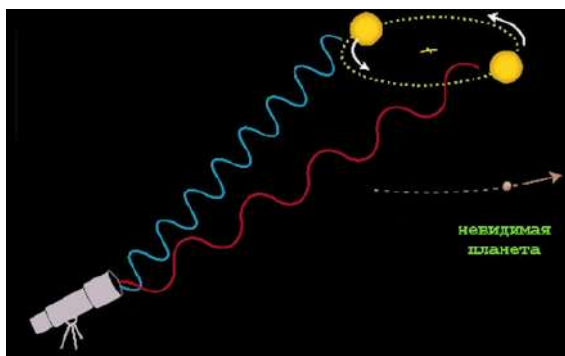


Рис. 18.20. Измерение положения спектральных линий

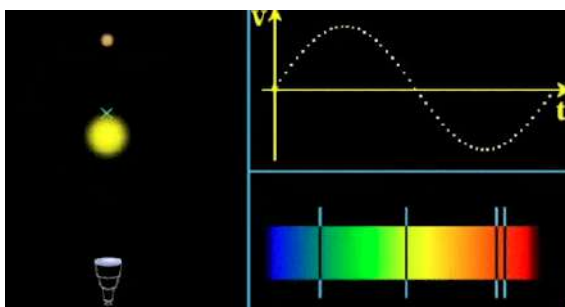


Рис. 18.21. Поиск экзопланет методом лучевых скоростей, использующим эффект Доплера

Так началась работа нескольких групп астрономов. Первая группа – профессор Джеффри Марси (*Geoffrey Marcy*) и его аспирант Пол Батлер (*Paul Butler*) начали полноценную работу по измерению спектру звезд и слабого перемещения спектральных линий.

Позже эту работу начали швейцарские астрономы, первооткрыватели экзопланет доплеровским методом (1995 г.) – Мишель Майор (*Michel Mayor*) и Дидье Кело (*Didier Queloz*). Они получили Нобелевскую премию по физике 2019 г.



Рис. 18.22. Paul Butler, Geoffrey Marcy

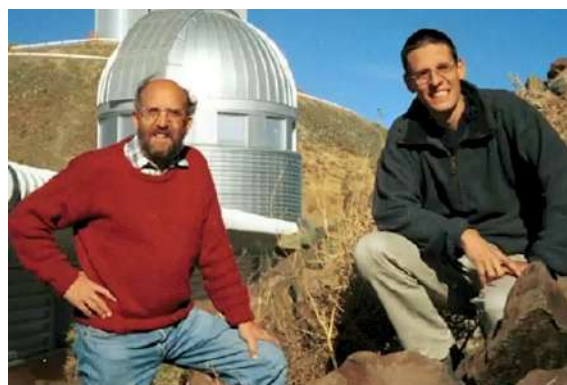


Рис.18.23. Michel Mayor и Didier Queloz

М. Майор и Д. Кело стали исследовать звезды и обнаружили, что звезда 51 в созвездии Пегас колеблется с амплитудой примерно 56 м в секунду, но с очень коротким периодом (чуть более 4 суток). По расчетам планета оказалась более массивной, чем Юпитер в нашей Солнечной системе. Наши планеты-гиганты находятся далеко от Солнца и их орбитальные периоды – это годы. А у планеты-гиганта, обращающегося вокруг 51 звезды, период обращения 4 дня – это значит, что планета находится очень близко к своей звезде.

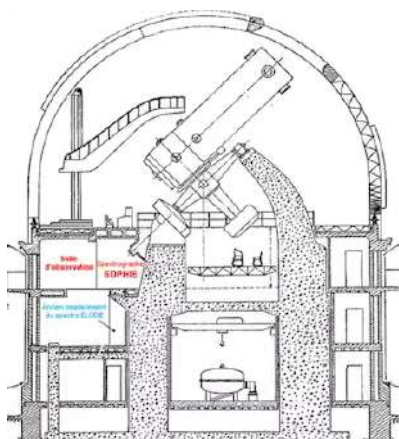


Рис. 18.24. Спектроскоп Майора и Кело

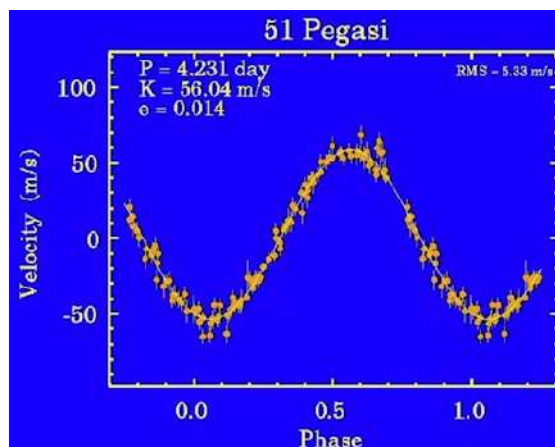


Рис.18.25. Звезда 51 в созвездии Пегас

Открытие очень массивных и очень близких к звезде экзопланет привело к рождению термина «горячий юпитер».

Загадка в том, что звезда должна была разогреть вещество и наиболее легкоиспаряющееся отбросить от себя на периферию планетной системы. Ученым было не ясно, как планета-гигант смогла сформироваться так близко к звезде, потому что близость к звезде приводит к интенсивному испарению атмосферы планеты.

Поиск экзопланет методом прохождений

Метод прохождений помог эффективнее и быстрее обнаруживать планеты у других звезд.

Метод прохождений, или транзитный метод (от англ. *transit* – проход), применяется в тех редких случаях, когда наблюдатель (т. е. мы) находится вблизи орбитальной плоскости планеты.

На рисунках 18.26 и 18.27 показана смоделированная ситуация, когда плоскость планетной орбиты ориентирована к нам, тогда можно заметить, как планета регулярно проходит и закрывает часть солнечного диска.

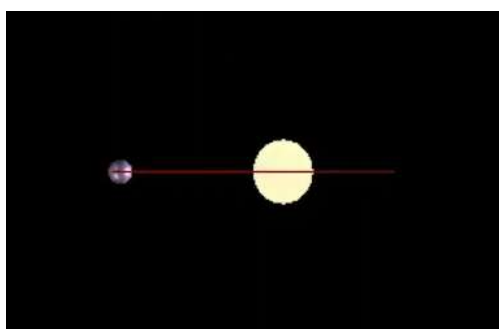


Рис. 18.26. Моделирование ситуации для поиска экзопланет методом прохождений

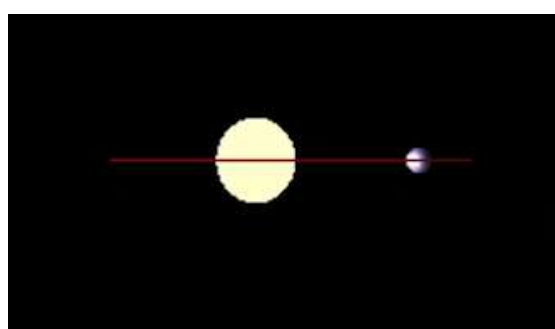


Рис.18.27. Моделирование ситуации для поиска экзопланет методом прохождений

Поиск планет за пределом Солнечной системы

Яркость поверхности звезды намного выше, чем поверхности планеты. Поэтому заметить покрытие (частичное затмение) звезды проще, чем различить рядом с ней свет планеты.



Рис. 18.28. Моделирование ситуации для поиска экзопланет методом прохождений

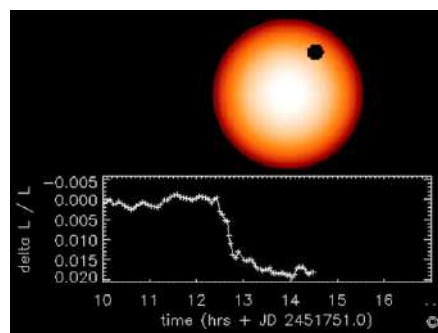


Рис.18.29. Транзит планеты по звездному диску

Этот метод особенно эффективно удалось реализовать с помощью космических телескопов. Для этой цели был запущен телескоп «Кеплер» и с 2009 по 2015 годы он использовался для поиска планет. За это время было найдено около 3500 планет.



Рис. 18.30. Космический телескоп «Кеплер», (NASA, 2009 г.)

Методы поиска экзопланет

Список методов поиска экзопланет:

1. *Radial Velocity* – лучевые скорости (спектр, эффект Доплера).
2. *Astrometry* – астрометрия (смещение в плоскости неба).
3. *Transit* – прохождение (изменение блеска звезды).
4. *Microlensing* – микролинзирование (гравитационное искривление лучей).
5. *Imaging* – прямое изображение (регистрация света планет).

В таблице 18.2 показана статистика открытия экзопланет по годам. В настоящее время астрономы почти ежедневно открывают по новой планете рядом с соседними звездами. В нашей же Солнечной системе планеты были открыты со скоростью примерно 1 планета/столетие: Уран был открыт в 18 веке, Нептун в 19 веке, Плутон в 20 веке.

Таблица 18.2. Статистика открытия экзопланет

Дата	Количество надежно обнаруженных экзопланет
6 октября 1995	1
5 октября 2003	117
14 декабря 2006	210
23 марта 2009	344
7 ноября 2012	843

1 декабря 2016	3544
11 марта 2019	4000
5 августа 2021	4806

Каталог экзопланет: <http://exoplanet.eu>.

Получение прямых изображений экзопланет

В настоящее время разработаны методы уменьшения яркости изображений звёзд, позволяющие рядом со звездой заметить планету и проследить за её движением по орбите (рис. 18.31).

В перспективе методы станут еще более сильными. По этому проекту Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx) планируется запустить в космос космический аппарат и дополнение к нему (рис. 18.32, 18.33).

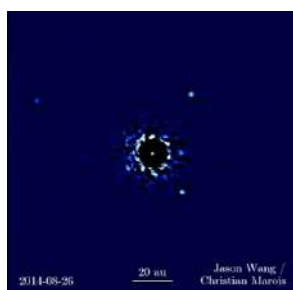


Рис. 18.31. Фотография планет за счет уменьшения яркости звезд

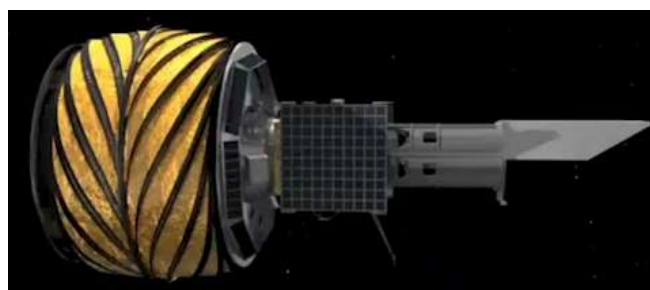


Рис.18.32. Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

Дополнение (рис. 18.33) отстыковывается, отлетает от космического телескопа. Дополнение раскрывается – это экран и уходит на большое расстояние от космического телескопа.

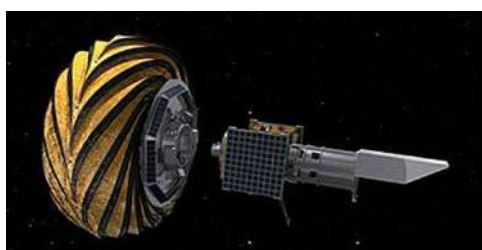


Рис. 18.33. Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

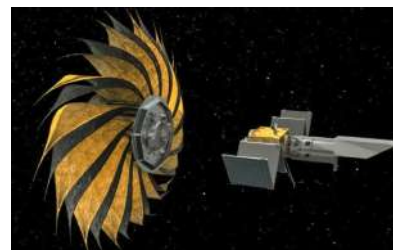


Рис.18.34. Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

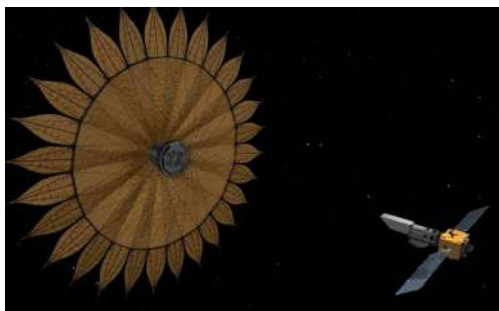


Рис. 18.35. Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

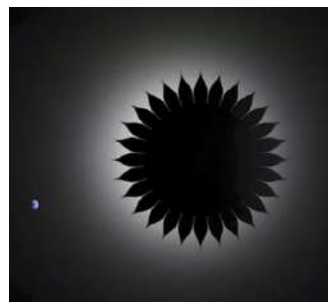


Рис.18.36. Habitable Exoplanet Imaging Mission (HabEx), NASA 2035

После раскрытия экран уходит на большое расстояние от телескопа и собой закрывает яркую звезду. При этом становятся видны планеты, которые расположены рядом со звездой.

Параметры телескопа:

- Диапазоны: видимый, UV, NIR, IR. Полная масса около 19 тонн.
- Запускается в точку L2 двумя тяжелыми ракетами.
- Телескоп 4 м с коронографом и экран диаметром 56 м на расстоянии 72 тыс. км

18. 2. Разнообразие планетных систем. Зона возможной жизни

Планетные системы, такие же многообразные, как наша Солнечная система – обнаружены. Например, существует планетная система Кеплер – 90 (рис. 18.37). В каталоге открытий телескопа «Кеплер» эта система значится 90-м номером. Ее сравнение с Солнечной системы показывает, что существуют почти полные аналоги нашей системы: гиганты вдали, планеты земного типа ближе к Солнцу. Общая архитектура этой планетной системы, количество планет и распределение по расстоянию довольно точно напоминает нашу Солнечную систему.



Рис. 18.37. Планетная система Кеплер – 90

Присутствие гигантов рядом со своими звездами кажется необъяснимым. Однако математические модели формирования планетных систем показывают, что это возможно. Гигантская планета может сформировать на периферии протопланетного диска, а потом, за счет торможения при движении в нем постепенно приблизиться к своей звезде (рис. 18.38). Ученым пока не очевидно, почему в одних системах этот процесс произошел, а в других нет, поэтому исследования продолжаются.

В первую очередь ученых интересуют планеты, похожие на Землю и на которых есть условия для жизни (климат, похожие на Земной). Земля находится в привилегированном положении в Солнечной системе, а именно на том расстоянии от Солнца, где оно нагревает поверхность планеты до нескольких десятков градусов, т.е. позволяет существовать жидкой воде.

Существует узкий коридор расстояний – *зона возможной жизни* ($0^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$) (рис. 18.39).

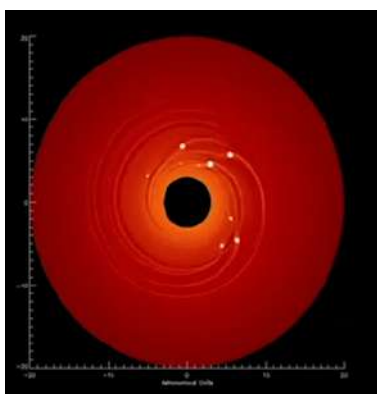


Рис. 18.38. Миграция формирующихся планет в протопланетном диске

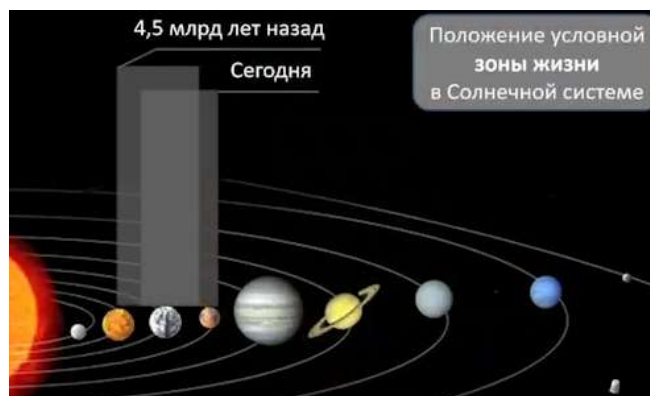


Рис. 18.39. Положение условной зоны жизни в Солнечной системе

Ученым хотелось бы найти такие же планетные системы с зоной возможной жизни. Такие системы уже открыты. Например, планетная система Кеплер – 22 (рис. 18.40).

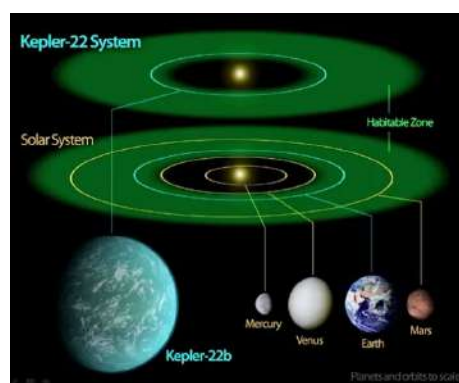


Рис. 18.40. Планетная система Кеплер-22

Подобные Земле экзопланеты в зоне жизни обнаружены (рис. 18.41). Но изображений их поверхности не существует! Далекие экзопланеты детально не сфотографированы.

На рисунке 18.42 показана планетная система TRAPPIST – 1. В ней существуют планеты земного типа, похожие на Землю. Планеты расположены в зоне жизни своей звезды.

Ближайшая к нам звезда с планетой оказалась ближайшей звездой, обнаруженной в космосе – Proxima. У нее обнаружено две планеты:

- Proxima Centauri b – $M \Rightarrow 1 M_E$, $a = 0,048 \text{ AU}$ (HZ – зона возможной жизни);
- Proxima Centauri c – $M \Rightarrow 6 M_E$, $a = 1,5 \text{ AU}$

К Proxima Cen – $M = 0,12 M_{\text{sun}}$ $T = 3000$ – это красный карлик. Поэтому условия жизни на предполагаемой планете скорее всего самые благоприятные.

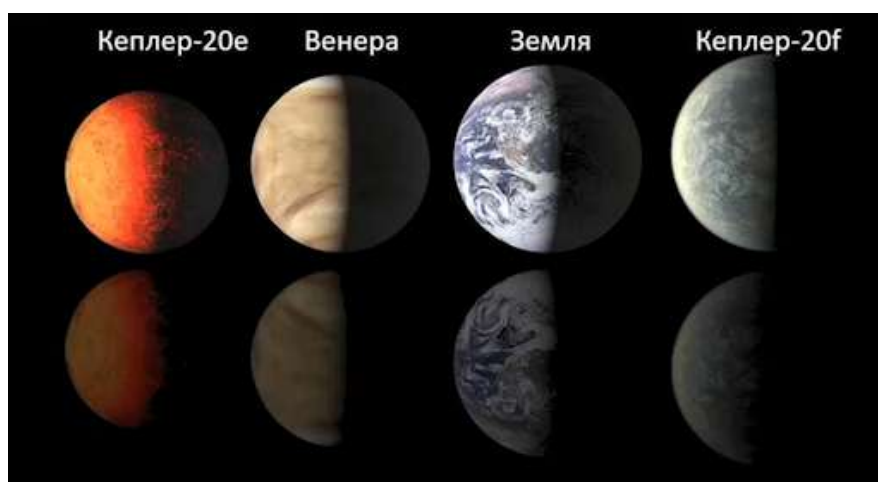


Рис. 18.41. Землеподобные экзопланеты



Рис. 18.42. Планетная система TRAPPIST – 1

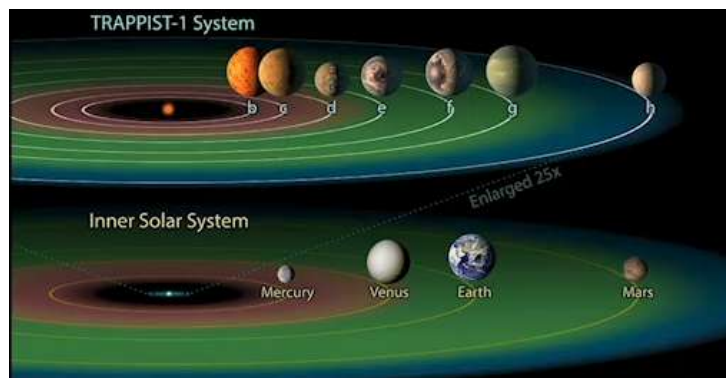


Рис. 18.43. Сравнение Солнечной системы и планетной системы TRAPPIST – 1

18.3. Поиски жизни и разума во Вселенной

Поиск жизни и разума прежде всего направлен на планеты и спутники нашей Солнечной системы.

В большинстве случаев жизнь должна скрываться под поверхностью планеты, где её очень трудно обнаружить. Пример: спутник Юпитера – Европа. Под его ледяным панцирем, вероятно, есть условия для жизни, но найти её будет нелегко.

Если существует другая разумная жизнь, то можно попробовать с ней связаться по радио. И такие работы существуют. Радиоволны – самый выгодный и дальнобойный носитель информации в космосе. Мы ищем сигналы внеземных цивилизаций уже 60 лет, но пока безрезультатно.

Литература.

- Фабрика планет. Автор: Элизабет Таскер
- Ошибка Коперника. Автор Калеб Шарф



Рис. 18.44. Радиотелескоп, 64 метра.
Паркс, Австралия



Рис.18.45. Фабрика планет. Автор:
Элизабет Таскер. Ошибка Коперника.
Автор Калеб Шарф

Урок 19. Природа планет земной группы

К планетам земной группы относят четыре планеты: Землю, Венеру, Марс и Меркурий.

Стоит отметить, что крупные спутники наших планет, такие как Луна или Галилеевы спутники Юпитера, отличаются от планет земной группы не очень сильно. Именно поэтому, стоит понимать, что природа планет земной группы и природа крупных спутников планет-гигантов незначительно отличаются друг от друга.

19.1. Физические условия на поверхности планет. Атмосфера

Прежде всего астрономов интересуют физические условия на поверхностях планет. Человечество живет на поверхности планеты Земля и ему необходимо для жизни получать солнечное излучение. Солнечным светом, как источником энергии, питаются почти все живые существа. Но существуют некоторые виды микроорганизмов, которым солнечный свет не нужен для жизни – они добывают энергию и вещество для размножения путем химических реакций. Такие микроорганизмы являются исключением.

Солнечный свет – это источник жизни и мощный источник энергии.

На одних планетах присутствуют благоприятные условия для жизни, другие планеты непригодны для жизни. Так, например, на Луне или на Меркурии нет атмосферы, воды; солнечный свет, особенно его жесткие виды лучей (УФ и рентгеновские), стерилизуют поверхность планеты – убивают все живое.

Астрономы стали задаваться вопросом: почему на небольших космических телах нет газовой и водной оболочки, и они присутствуют на крупных. Так, Луна и Земля находятся в одном диапазоне расстояний от Солнца – в зоне возможной жизни.

Земля – массивное тело, у поверхности которого вторая космическая скорость – велика в сравнении со скоростью движения молекул в атмосфере. Характерная скорость движения атомов молекул в атмосфере Земли – сотни/тысячи м/с; вторая космическая скорость на поверхности – 11,2 км/с. По этой причине атомы и молекулы воды и воздуха не могут оторваться и улететь в космос. Луна почти в 4 раза меньше Земли по диаметру, в 81 раз меньше по массе и вторая космическая скорость на ее поверхности около 2 км/с. Это значит, что у поверхности Луны не удерживаются летучие вещества

Таблица 19.1. Соотношение параметров Луны и Земли

	Луна / Земля
Размер:	1/3,7
Масса:	1/81
Сила тяжести:	1/6

Поверхности безатмосферных тел

Поверхности безатмосферных тел сильно различаются. На рисунке 19.1 показаны Меркурий и спутник Сатурна – Энцелад – оба они лишены атмосферы. Однако эти тела выглядят по-разному, Меркурий – темный, а Энцелад – светлый, белый. Это различие происходит из-за того, что они покрыты разным веществом: Меркурий покрыт минеральным веществом (камнем), Энцелад, в силу того что он находится далеко от Солнца и температура там около -180 градусов, покрыт льдом.



Рис. 19.1. Отражение солнечного света от поверхности Меркурия (9%) и Энцелада (81 %)

У малых тел Солнечной системы – у астероидов и комет – разная поверхность и внутреннее строение. Астероиды – это каменные тела, т.к. они летают недалеко от Солнца и нагреваются его лучами. Ядра комет снаружи почти неотличимы от астероидов, однако внутри комет в основном находится лёд.



Рис. 19.2. Слева – астероид Эрос. Справа – ядро кометы 67P/Чурюмова-Герасименко

Отражение солнечного света от поверхности Эроса – 12 %, а от поверхности кометы Чурюмова-Герасименко – 2 %.

Альбедо – доля отраженного солнечного света. Если альбедо равно 1, то это абсолютно белое тело, отражающее Солнечные лучи, если альбедо равно 0, то тело абсолютно черное, но таких тел в природе не существует.

В зависимости от того, насколько хорошо поверхность отражает или впитывает лучи Солнца, меняется температура этой поверхности: тёмное – поглощает солнечное излучение, и стимулирует увеличение температуры, светлое – отражает.

Загадка Меркурия и Венеры

Меркурий находится почти в 2 раза ближе к Солнцу, чем Венера. Это значит, что потока Солнечного света на него приходится больше. Его поверхность обладает слабым отражающим свойством (9%). Из этого следует, что Меркурий должен быть горячим. Венера находится дальше от Солнца (0,72 а.е.) и отражает почти весь солнечный свет (76%) – только почти 25% солнечного света достигает поверхности Венеры – из этого факта следует, что Венера должна быть холоднее Меркурия. Однако это на самом деле не так: на полюса Меркурия солнечный свет падает слабо – там глубоко отрицательные температуры (-75 градусов), в районе экватора днем жарко, ночь холодно, но средняя температура около 70 градусов. На Венере и на полюсах, и в районе экватора температура составляет +462 градуса.

Таблица. 19.2. Сравнение температур на поверхности Меркурия и Венеры

	Расстояние от Солнца	Коэффициент отражения	Средняя температура поверхности
Меркурий	0.39 а.е.	9%	-75 °C у полюсов +67 °C у экватора
Венера	0.72 а.е.	76%	+462 °C на всей поверхности

19.2. Парниковый эффект

Нагревание и охлаждение

Рассмотрим, как нагревается вода на конфорке плиты: если необходимо вскипятить воду до 100 градусов, с открытой крышкой такой температуры достигнуть не получается и нет возможности увеличить приток тепла, тогда следует уменьшить потери тепла можно, закрыв крышку.

Таким образом, если нет возможности увеличить приток тепла, то, чтобы довести воду до кипения, нужно снизить потери тепла.



Рис. 19.3. Схема нагрева воды до 100 градусов

Баланс тепла у поверхности Земли

Парниковый эффект повышает температуру поверхности тех планет, у которых есть атмосфера. Солнечный свет частично нагревает поверхность планеты. В процессе остывания поверхность не может выбросить большое количество газа, остается инфракрасное излучение. Многие молекулы в атмосфере планеты (углекислый газ, пары воды, метан) плохо пропускают инфракрасное излучение и поверхность нагревается еще сильнее.

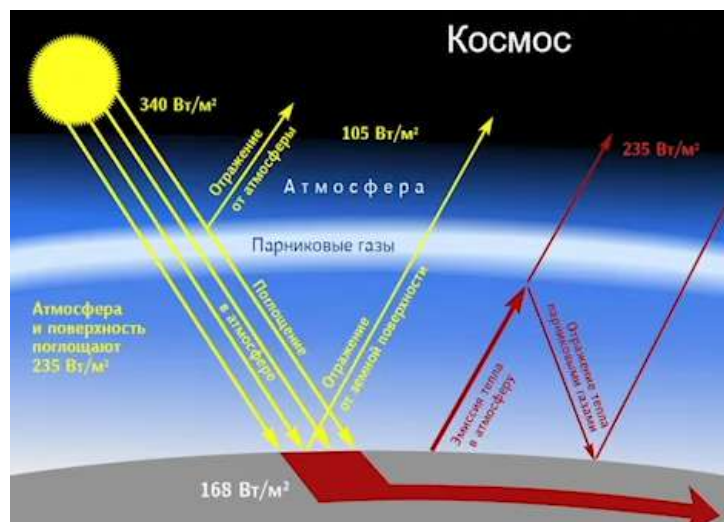


Рис. 19.4. Баланс тепла у поверхности Земли

В таблице 19.3 показан результат парникового эффекта, который действует или не действует на те или иные тела. Т.к. Меркурий и Луна лишены атмосферы, то парниковый эффект там – нулевой; у Марса атмосфера разреженная, поэтому парниковый эффект повысил температуру его поверхности на несколько градусов (средняя температура Марса около -61 градуса). На Земле парниковый эффект – важная вещь, т.к. он добавляет практически 40 градусов к температуре Земли. Средняя температура нашей планеты примерно +14 - +15 градусов, а без парникового эффекта температура планеты составляла бы -25 градусов.

В настоящее время газы, которые выбрасываются промышленностью и сельским хозяйством, усиливают парниковый эффект. Поэтому температура Земли повышается и этот эффект необходимо регулировать.

На Венере парниковый эффект достиг невероятного значения – около 500 градусов выше предполагаемой температуры. Т.е., если бы Венера не имела атмосферу, то температура на планете была бы около 0 градусов.

Таблица 19.3. Влияние парникового эффекта

	ΔT
Меркурий и Луна	0
Марс	8
Земля	39

Земля получает 1:10 млрд солнечного тепла, а если направить весь солнечный свет на Землю, то за 4 минуты испарился бы весь Мировой океан, за 10 дней планета бы полностью была разрушена.

19.3. Планеты земной группы

Существуют 4 планеты, относящиеся к землеподобным:

- Меркурий;
- Венера;
- Земля;
- Марс.

Внешне они не очень похожи друг на друга, но близки по размеру и массе. Разница в размере и массе, а также расстояние от Солнца, определяют разные условия на поверхности планет. Например, на Земле есть атмосфера, которая в основном состоит из азота и с небольшой примесью кислорода. Кислород – результат жизнедеятельности организмов на Земле. На Венере и на Марсе атмосфера состоит почти из чистого углекислого газа, однако на Марсе атмосфера почти в 200 раз разреженнее земной атмосферы, а атмосфера Венеры почти в 100 раз плотнее земной атмосферы.



Рис. 19.5. Планеты земной группы

Внутреннее строение землеподобных планет.

Внутреннее строение планет земной группы не сильно отличается от одной планеты к другой. У каждой планеты вещество внутри разделено на фракции:

- тяжелые и плотные вещества – опускаются вниз и, нагреваясь там, формируют жидкую часть ядра (под большим давлением – твердую часть);
- более легкие вещества (минеральные) поднимаются наверх (в полумягком состоянии они находятся в мантии, а в застывшем состоянии формируют кору).

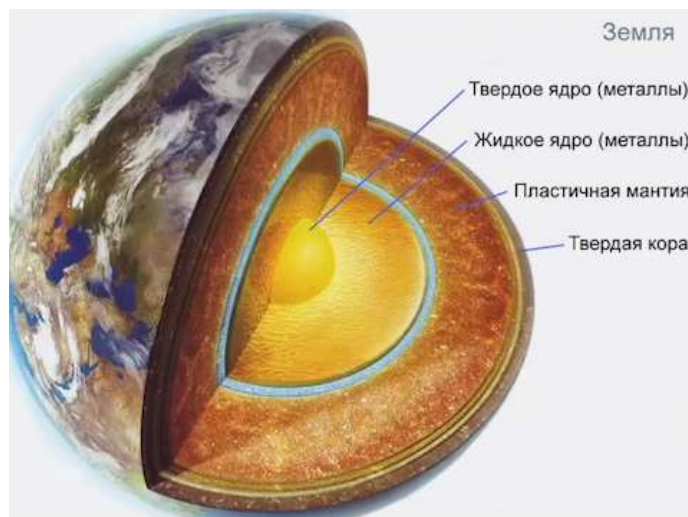


Рис. 19.6. Внутреннее строение землеподобных планет

Меркурий и Венеру изучать трудно. Угол максимальной элонгации Меркурия никогда не превышает 28 градусов, поэтому он всегда виден рядом с Солнцем.

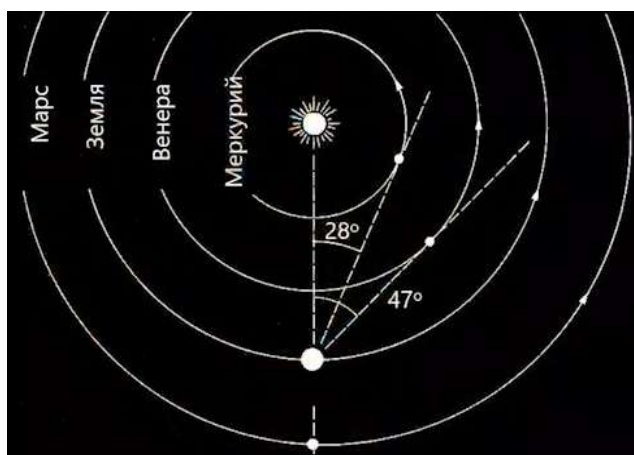


Рис. 19.7. Углы максимальной элонгации Меркурия и Венеры

Венера

Галилео Галилей в 1610 г. впервые обнаружил фазы Венеры – это было самое сложное астрономическое открытие Галилея.

Угол максимальной элонгации Венеры составляет около 47 градусов. На рисунках 19.8, 19.9 показаны фазы Венеры в различные моменты ее движения по орбите: Солнце освещает ее поверхность, однако наблюдать ее все еще трудно.



Рис. 19.8. Венера



Рис. 19.9. Венера

Представления о природе Венеры сильно изменились на рубеже 1950-1960х годов.

В любом книжном магазине можно найти книгу братьев Стругацких: «Страна багровых туч». Книга написана в 1952-57 годах. Фантасты, как и многие другие писатели, разделяли представление ученых о Венере. Интересно, что Борис Стругацкий был профессиональным астрономом и он хорошо знал современные ему научные представления об этой планете. В тот момент Венеру представляли почти копией Земли.

На рисунке 19.10 представлены три фотографии внешнего вида Венеры (слева – направо), сделанные наземным телескопом, космическим телескопом «Хаббл» и межпланетным зондом «Akatsuki» (Япония).

На инфракрасном снимке ночной стороны Венеры (рис. 19.11), полученном в диапазонах 1,74 и 2,26 мкм японским зондом «Akatsuki» в 2016 г., видны светящиеся тёплые слои облаков с температурой от 40 до 100 °C на высотах от 48 км до 54 км от поверхности.



Рис. 19.10. Внешний вид Венеры



Рис. 19.11. Инфракрасный снимок Венеры

Венера вращается очень медленно (-243 суток). Но её атмосфера вращается быстро (4 суток).

Поверхность Венеры была изучена с помощью космических аппаратов, которые сначала сканировали (сквозь облачный слой) поверхность небольшими радарами. Так были получены первые радиолокационные карты венерианской поверхности (рис. 19.12). На карте намечены возвышенные места (желто-красные) и низменности (голубые области).

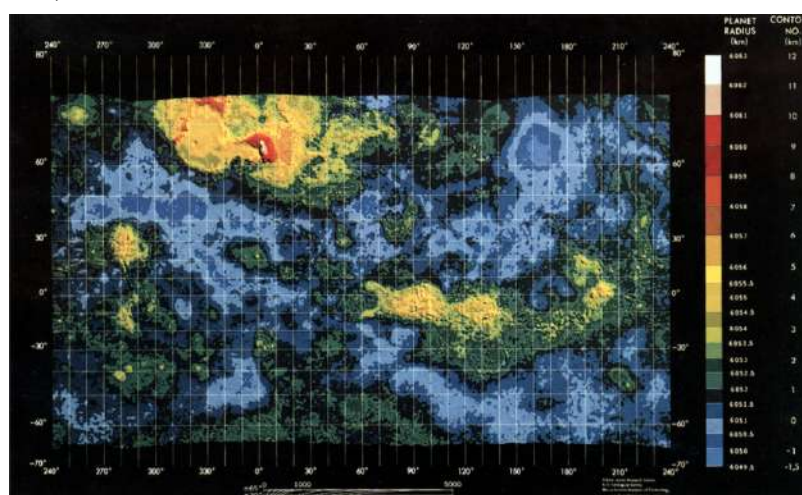


Рис. 19.12. Первая топографическая карта Венеры

На рисунке 19.13 отмечены места посадок на поверхность Венеры космических аппаратов – это результат работы советских инженеров и ученых.

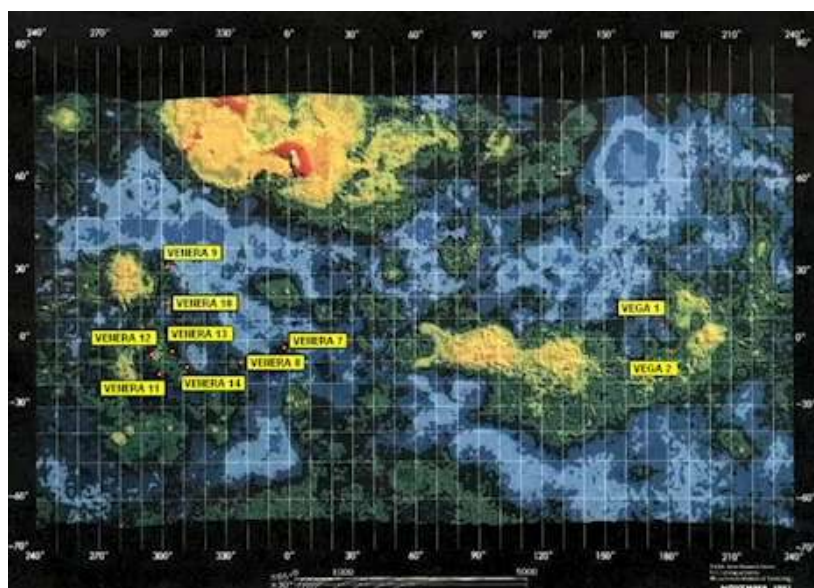


Рис. 19.13. Первая топографическая карта Венеры с отмеченными местами посадок космических аппаратов

На иллюстрации 19.14 показана схема последнего эксперимента.

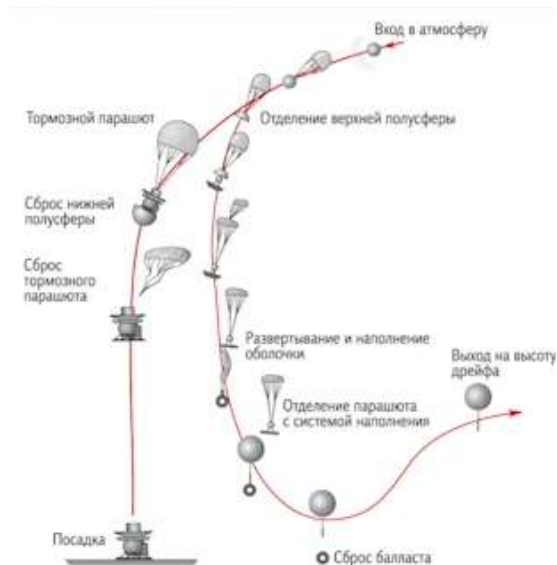


Рис. 19.14. Спускаемый аппарат серии «Венера» (СССР, 1975-1986)



Рис. 19.15. Спускаемый аппарат серии «Венера» (СССР, 1975-1986)

На рисунке 19.16 показана фотография, сделанная В.Г. Сурдиным в музее Института космических исследований в Москве, спускаемого аппарата и зонда «ВеГа». Размер аппарата составляет около 170 см.

Посадочные аппараты (рис. 19.17), безусловно, были защищены от большого давления окружающего газа. Однако главной проблемой было не давление, а крайне высокая температура. У поверхности Венеры давление атмосферы 93 бар, температура 464 °С, скорость ветра около 1 м/с. Поэтому даже самые устойчивые из зондов смогли проработать не более 2-х часов на поверхности Венеры. За два часа зонды успевали пробурить поверхность, взять пробы грунта и сквозь специальный люк отправить на исследование этот образец внутрь.



Рис. 19.16. Спускаемый аппарат и атмосферный зонд «ВеГа»



Рис. 19.17. Спускаемый аппарат и атмосферный зонд «ВеГа»

На рисунке 19.18 показаны фотографии венерианской поверхности. Они выглядят необычно в силу того, что камера поворачивалась.



Рис. 19.18. Фотографии венерианской поверхности

Такие фотографии не дают представление о всей поверхности. Поверхность Венеры изучили радиолокационные спутники. Сначала это были советские спутники «Венера-15» и «Венера-16», а позже и американский – «Магеллан». Благодаря работе этих спутников составлена радиолокационная карта Венеры (рис. 19.19).

По радиокартам Венеры был определен ее рельеф (рис. 19.20, рис. 19.21). На фотографиях немного растянут вертикальный масштаб: горы Венеры более пологие. На горах видны метеоритные кратеры. Т.к. на Венеру не могут прорваться маленькие метеориты (из-за разрушения в плотной атмосфере), то на поверхности планеты всегда видны крупные метеоритные кратеры.

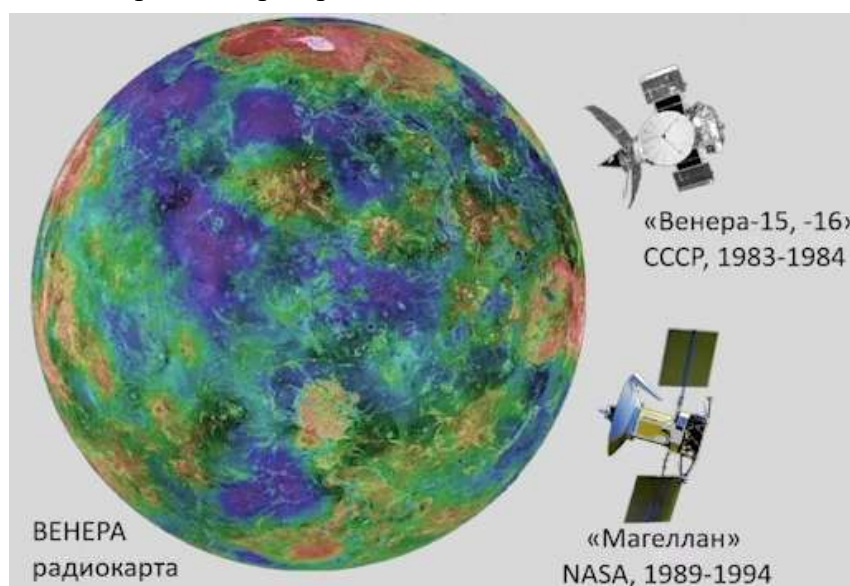


Рис. 19.19. Радиокарта Венеры



Рис. 19.20. Венера. Гора Маат (высота 2 км)

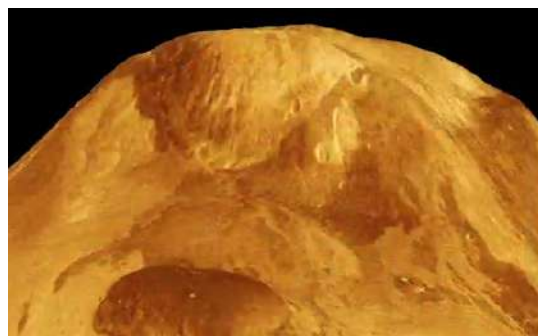


Рис. 19.21. Венера. Гора Маат (вершина)

Карту Венеры (рис. 19.22) можно приобрести в магазинах.

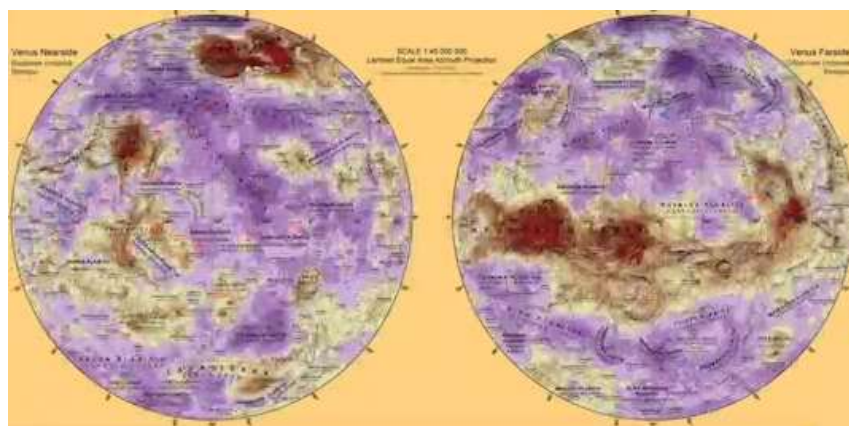


Рис. 19.22. Карта рельефа Венеры

Самую детальную карту составил Е. Н. Лазарев, ред. Ж. Ф. Родионова, рук. В. В. Шевченко (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга и географический ф-т МГУ).

Кроме того, ученые создали модель глобуса Венеры (рис. 19.23, рис. 19.24) – это радиоизображение: яркие места – это поднятия. Самое высокое место на Венере составляет 11 км. Эта гора названа именем Д.К. Максвелла – создателем теории радиоволн. Остальные географические названия на Венере – женского рода.

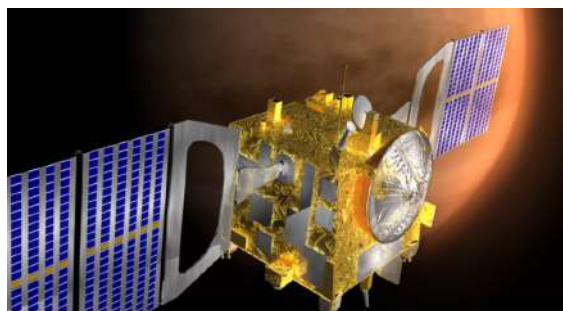


Рис. 19.23. Глобус Венеры



Рис. 19.24. Глобус Венеры

Изучение Венеры активно продолжается современными спутниками (рис. 19.25, рис. 19.26), однако посадки на поверхность давно прекратились.



*Рис. 19.25. Венера-Экспресс (ЕКА),
2006-2014*

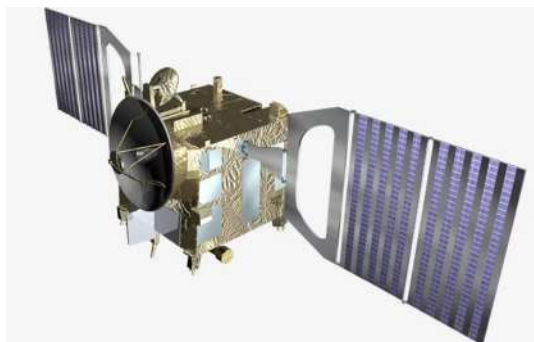


Рис. 19.26. Акацуки (Япония), 2015-...

Урок 20. Поиск жизни в Солнечной системе. Марс

Жизнь на Земле существует прежде всего благодаря наличию жидкой воды. С одной стороны, наша планета настолько массивная, чтобы удерживать вокруг себя атмосферу и водную оболочку, с другой стороны атмосфера не настолько плотная, как, например, на Венере, чтобы вызвать перегрев поверхности в результате парникового эффекта. Слабый парниковый эффект работает и поддерживает комфортную температуру на поверхности нашей планеты, наличие жидкой воды. Поэтому Земля является идеальным местом для жизни с точки зрения человека.

Рядом с Землей находится ее спутник – Луна.

20.1. Луна как запасная планета

Поверхность Луны – сухая и безатмосферная. Астрономы составили глобус Луны (рис. 20.1., 20.2) по фотографиям, сделанными космическими аппаратами. Левая фотография наиболее знакома всем жителям планеты – это то полушарие, которое обращено в сторону Земли, с застывшими лавовыми морями. Ученым интересно, почему Луна – асимметрична: одно полушарие так сильно отличается от другого.



Рис. 20.1. Безжизненная поверхность
Луны



Рис. 20.2. Безжизненная поверхность
Луны

Астрономы шутят: «жизнь на Луне была – с 1969 по 1972 годы».



Рис. 20.3. Пилотируемая экспедиция на
Луне

Луна маломассивна и не способна удержать атмосферу. Поэтому, даже находясь в благоприятной области (зоне возможной жизни), Луна не удержала у своей поверхности атмосферу и воду.

Астрономы считают, что есть шанс, что будет обнаружена жизнь в недрах Луны. Дело в том, что в недрах Луны температура благоприятная для жизни, а в минеральном веществе Луны есть небольшое количество воды (вечная мерзлота). Кроме того, на Луне нет парникового эффекта и средняя температура на несколько десятков градусов ниже температуры Земли.

20.2. Жизнь за пределами зоны жизни

В нашу эпоху Марс находится на границе зоны возможной жизни.

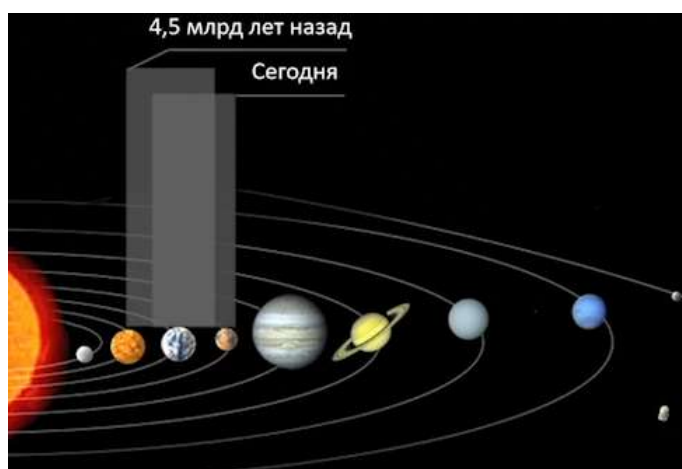


Рис. 20.4. Планеты Солнечной системы

У планет-гигантов есть свои спутники, но условия для жизни на их поверхности еще менее благоприятные, чем на поверхности Луны, из-за сформировавшихся в мощном магнитном поле Юпитера из заряженных частиц огромных радиационных поясов.

Таблица 20.2. Доза радиации на поверхности, в единицах бэр/сут (бэр – биологический эквивалент рентгена)

Кольца	Ио	Европа	Ганимед	Каллисто
18 000	3600	540	8	0,01

Предел для работника АЭС – 0,014 бэр/сутки. Смертельная разовая доза – 450 бэр/сутки.

Слой грунта/льда толщиной в несколько метров полностью поглощает радиацию. На рисунке 20.5 показан спутник Юпитера – Европа, который покрыт льдом – толстой ледяной оболочкой.

Европа считается перспективным местом для существования жизни. На рисунке 20.6 (лев) показан рисунок художника, а на рисунке 20.6 (прав) реальная фотография – ученые наблюдали, как из трещин во льду Европы бьют мощные водяные гейзеры.



Рис. 20.5. Европа (спутник Юпитера)



Рис. 20.6. Гейзеры из подлёдного океана Европы

20.3. Марс и его природа

В геологическом смысле Марс – очень интересная планета: гигантские каньоны и самые высокие горы (до 26 км). Фотография (рис. 20.7) Марса сделана космическим телескопом «Хаббл»: голубая дымка свидетельствует о том, что на Марсе есть атмосфера. В то же время, она не очень плотная, так как сквозь нее видны географические детали. Ученых также привлекает полярная шапка, из-за которых создается впечатление, что Марс – это почти полный аналог Земли.

Исследования последних лет показали, что центральная часть – самая холодная часть полярных шапок – это замерзшая вода. Но периферия полярной шапки, как правило, состоит из замершего углекислого газа. Дело в том, что атмосфера Марса – это почти чистый углекислый газ и при низких полярных температурах углекислый газ замерзает.

В нашу эпоху геологическая активность Марса слабая. Магнитного поля практически нет, а уровень космической радиации на поверхности высокий.

Марсианский пейзаж в кратере Гейл на месте посадки марсохода Curiosity (NASA) в 2012 г.

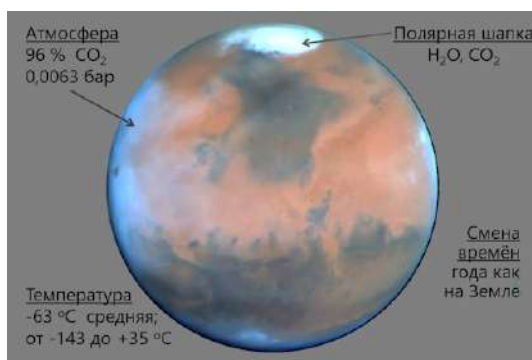


Рис. 20.7. Марс



Рис. 20.8. Марсианский пейзаж в кратере Гейл на месте посадки марсохода Curiosity (NASA)

Марсианский пейзаж не сильно отличается от земного (рис. 20.8, 20.9). Кроме того, Марс имеет самые высокие в Солнечной системе горы, такие как, Олимп (высотой 25 км). Гора Олимп – это древний потухший вулкан, диаметром почти 500 км.



Рис. 20.9. Марсианский пейзаж в кратере Гейл на месте посадки марсохода Curiosity (NASA)



Рис. 20.10. Гора Олимп

На Марсе присутствуют долины, внешне очень похожие на русла древних рек (рис. 20.11). Существует несколько теорий касательно того, почему на Марсе нет воды: одни ученые уверены, что вода испарилась в космос, другие ученые утверждают, что большая часть воды не испарилась в космос, а замерзла в виде слоев вечной мерзлоты и ушла под грунт.

Поверхность Марса – сухая и имеет красноватый оттенок (рис. 20.12). Во-первых, поверхность окислилась кислородом. Во-вторых, в атмосфере Марса всегда летают мелкие пылинки, которые плохо пропускают голубое и фиолетовое излучение Солнца, но легче пропускают красное излучение.

Существует много научно-фантастических кинофильмов (рис. 20.14), посвященных исследованиям красной планеты. Некоторые фильмы – в духе фэнтези, другие – более научные.

Владимир Георгиевич Сурдин рекомендует к просмотру фильм «Марсианин», в котором природа поверхности Марса показана близкой к реальной. Несмотря на то, что люди еще не бывали на Марсе, но создатели фильма совместно работали с учеными и исследователями, изучающими поверхность Марса.

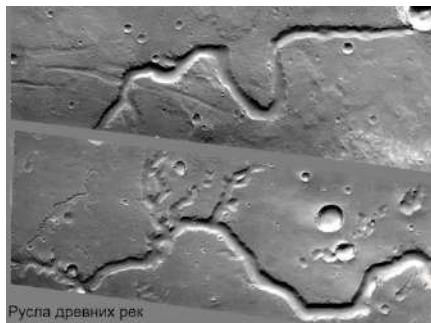


Рис. 20.11. Русла древних рек



Рис. 20.12. Поверхность Марса



Рис. 20.13. Поверхность Марса



Рис. 20.14. «Марсианин». Обложка к фильму реж. Р. Скотта



Рис. 20.15. Кадр из фильма «Марсианин». Режиссер: Р. Скотт



Рис. 20.16. Кадр из фильма «Марсианин». Режиссер: Р. Скотт

Исследования Марса производятся с помощью космических аппаратов-роботов. Первая удачная посадка на Марс была совершена в 1971 году советским аппаратом «Марс-3». Однако через несколько секунд связь с этим аппаратом пропала. Ученым до сих пор неизвестно, почему аппарат перестал передавать сигнал.



Рис. 20.17. «Марс-3», ССР, 1971



Рис. 20.18. Почтовая марка с изображением марсохода

На рисунках 20.19-20.20 показаны кадры из фильма, в которых режиссеры показали свое представление о первой посадке космического аппарата «Марс-3» на поверхность Марса.



Рис. 20.19. Кадр из фильма. Первая посадка на Марс



Рис. 20.20. Кадр из фильма. Первая посадка на Марс

Позже американские инженеры создали аппараты «Викинг-1» и «Викинг-2» и запустили в 1976-1982 годах. Роботы в 1976 году опустились на Марс и несколько лет удачно проработали.

До сих пор на Марс летают стационарные аппараты (рис. 20.22). Последний из них (InSight) имеет приборы, которые внедряются в грунт, прослушивают сейсмические колебания. Такие аппараты не могут исследовать большие области.



Рис. 20.21. Изобретатель аппарата «Викинг»

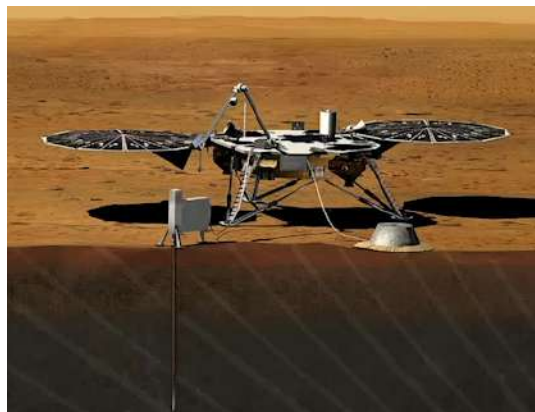


Рис. 20.22. Стационарные аппараты на Марсе

Для исследования больших областей пространства необходимы марсоходы. Первый из них опустился на Марс в 1996 году (рис. 20.23). На рисунке 20.24 показаны все космические роботы, с помощью которых изучается поверхность Марса.

До сих пор самым удачным оказался марсоход Opportunity, который проработал в течение 14 лет (в период с 2004 по 2008 годы).

Нынешнее поколение марсоходов – это *Curiosity*, который опустился на Марс в 2012 году и *Perseverance*, который опустился на Марс в 2021 году.



Рис. 20.23. Mars Pathfinder и ровер Sojourner (NASA)



Рис. 20.24. Мобильные лаборатории на Марсе



Рис. 20.25. Марсоход Opportunity



Рис. 20.26. Марсоход Perseverance (NASA)

Современная космонавтика готова к организации полётов человека на Марс. Главное препятствие – радиация.



Рис. 20.27. Летающая лаборатория Ingenuity (NASA)



Рис. 20.28. Пилотируемые экспедиции к Марсу

Полёт на Марс занимает много времени (от 8 до 9 месяцев). Это значит, что космонавты получают сильное облучение радиацией.

На рисунке 20.29 показана численная доза радиации, которые человек получает в разных местах.

Бэр – единица измерения радиации, биологический эквивалент рентгена.

Максимально допустимая доза для работников АЭС – 5 бэр в год. При полете к Марсу и обратно доза составит не менее 80 бэр.



Рис. 20.29. Годовая доза облучения космонавта

В итоге эта проблема радиации будет решена. Существует два варианта:

- более надежная защита от радиации;
- более быстрые полеты.

Урок 21. Кольца и спутники планет. Малые тела Солнечной системы

21.1. Кольца и спутники планет. Планеты-спутники

На иллюстрациях в различных книгах, художники обычно рисуют кольцо Сатурна. Кольца – это не твердое образование, а колоссальное количество мелких частиц, пылинок и т.д., которые летают по орбите.

Оказывается, не только у Сатурна есть кольцо, а у каждой планеты-гиганта. Рисунок 21.1 – характерное изображение планет-гигантов. Кольцо Сатурна составляет незначительную часть вещества и не добавляет массы к массе самой планеты.

Корректнее изображать планеты-гиганты без колец, т.к. кольца – незначительная и, возможно, временная часть околопланетного пространства (рис. 21.2).

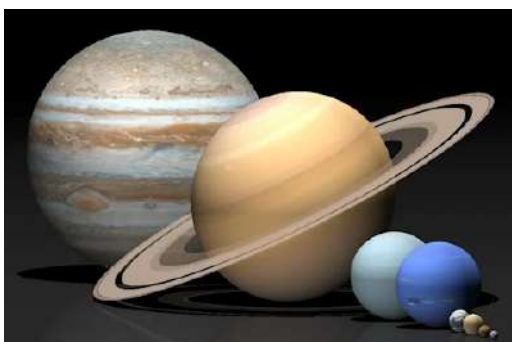


Рис. 21.1. Традиционное изображение планет

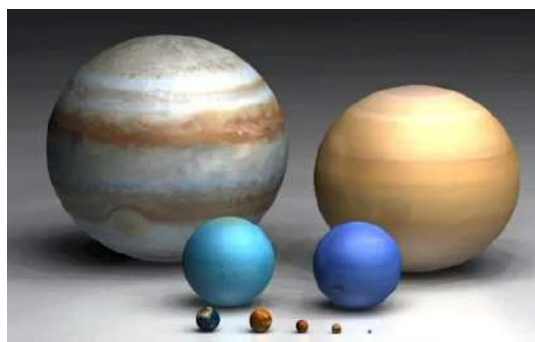


Рис. 21.2. Правильное изображение планет

Сатурн

Кольцо Сатурна имеет очень сложное строение. Фактически, оно разделено на тысячи отдельных мелких колец. Тень от колец на планете говорит об их высокой плотности. На рисунке 21.3 показаны тени от колец на планете, и тень самого Сатурна на кольце.

Снимок (рис. 21.4) получен зондом «Кассини» (NASA) в контровом освещении, т. е. с ночной стороны планеты. Плотные кольца из крупных частиц стали темными. А разреженные кольца из мелких частиц и пыли теперь отчетливо видны.



Рис. 21.3. Кольца Сатурна



Рис. 21.4. Снимок Сатурна, полученный зондом «Кассини» (NASA)

Уран и Нептун

У Урана и Нептуна есть кольца. На рисунке 21.5 показана фотография Урана, сделанная телескопом «Хаббл». Ось вращения Урана ориентирована практически горизонтально. Точки, которые присутствуют на фотоснимке рядом с Ураном расшифрованы на правом изображении рисунка 21.5 – это спутники.

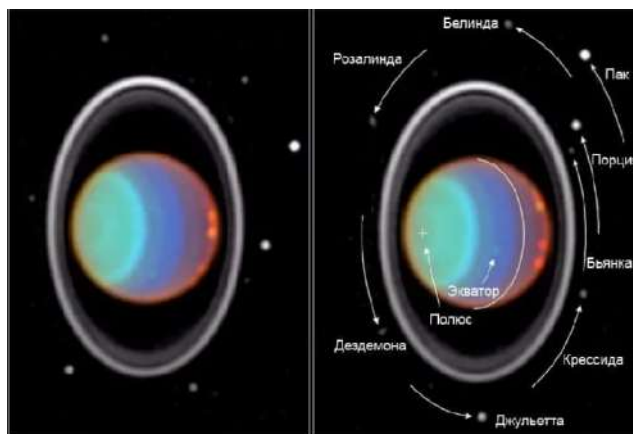


Рис. 21.5. Кольца Урана

Луна, как наиболее изученный спутник

Наиболее изученный спутник планет – это Луна. Однако, даже самые четкие снимки Луны, полученные в телескоп, не дают возможности увидеть детали размером менее 0,5 км.

Обратную сторону Луны с Земли увидеть невозможно, так как движение этих двух планет синхронизовано: вращение Луны вокруг своей оси и вращение Луны вокруг Земли происходит с одним и тем же периодом в месяц.

Впервые второе (обратное) полушарие Луны удалось увидеть только в 1959 году, когда советские инженеры и ученые создали первый спутник «Луна-3», который и сфотографировал неизвестную сторону и по радио передал снимки на Землю.



Рис. 21.6. Спутник «Луна-3», СССР, 1959



Рис. 21.7. Спутник «Луна-3», СССР, 1959

Траектория полета спутника и первая полученная фотография обратного полушария Луны показаны на рисунках 21.8 и 21.9. Первая (левая) треть снимка – это

часть видимого полушария. Такой формат снимка давал возможность ученым связать то, что они увидели впервые со знакомыми деталями. В ту эпоху это считалось крайне сложным экспериментом, т.к. не было современной электроники и фотокамер.



Рис. 21.8. Траектория полета аппарата «Луна-3»

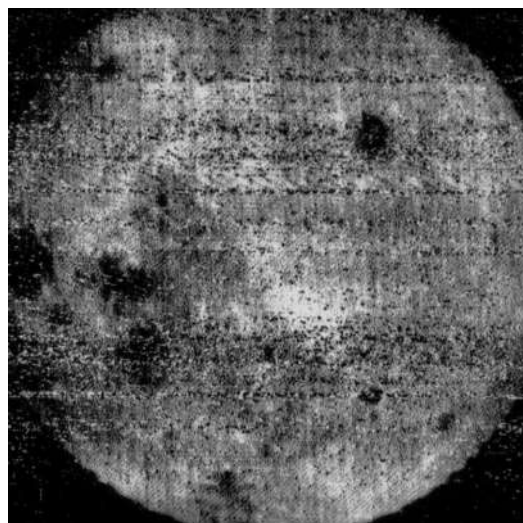


Рис. 21.9. Первая фотография обратной стороны Луны

В настоящее время получены более четкие снимки двух полушарий: видимое полушарие Луны богато морями – это гигантский кратеры от крупных метеоритов, на обратном полушарии нет крупных кратеров (есть один небольшой – «Море Москвы»).



Рис. 21.8. Обратное полушарие



Рис. 21.9. Видимое полушарие

В настоящее время построены карты не только видимого ландшафта Луны, но и ее гравитационного поля (рис. 21.10). Карта составлена с помощью специальной пары аппаратов (в рамках эксперимента GRACE), которые чувствуют небольшие колебания гравитационного поля, что позволяет составить карту флуктуаций (отличий гравитационного поля от однородного). На карте показаны так называемые масконы

(от англ.: *mass concentration*): красным цветом – области с положительными аномалиями, синим цветом – области с отрицательными аномалиями.

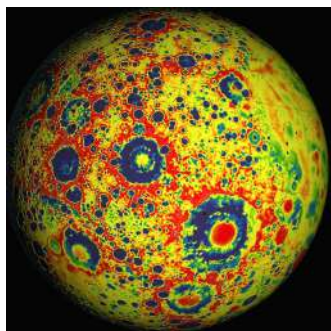


Рис. 21.10. Гравитационное поле Луны

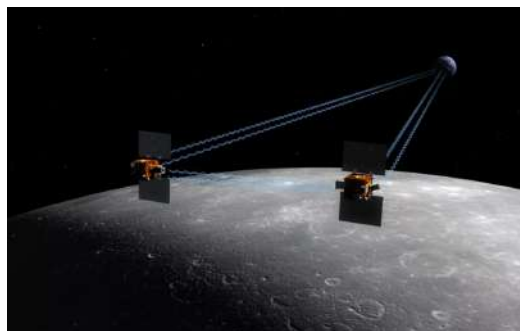


Рис. 21.11. Эксперимент GRAIL, NASA, 2011-2012

Структура крупных холодных спутников

Спутники других планет бывают внешне (по размеру и массе) похожи на Луну, но имеют другую природу поверхности.

Ио (спутник Юпитера) – уникальный объект. Большинство спутников планет-гигантов устроены примерно одинаково: минеральное ядро и застывшая мантия (рис. 21.12):

- 1 – замерзший азот;
- 2 – водный лёд;
- 3 – силикаты и лёд.

Такая структура возможна у Плутона и подобных ему тел. Строение более крупных тел (Ганимед, Тритон и др.) может быть сложнее. У Луны внутреннее строение отличается – это более каменистое тело и летучих веществ в ней осталось немного. Существует много удивительных спутников, и самый интересный среди них – это Титан (рис. 21.13)

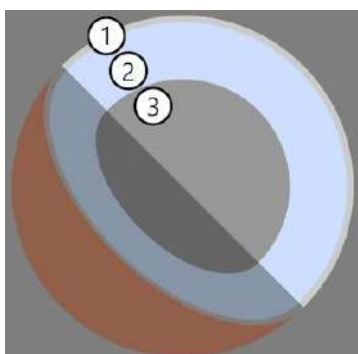


Рис. 21.12. Строение крупных спутников



Рис. 21.13. Спутники планет (Титан и Луна в сравнении)

На рисунке 21.13 Титан, Луна и Земля изображены в одном масштабе: Титан намного крупнее Луны. Размер Титана примерно такой же, как у планеты Меркурий.

Но Титан – намного более планета, чем Меркурий: у Титана есть атмосфера, а также моря и океана, наполненные жидкими природными газами (метан, этан, пропан).

В оптическом диапазоне Титан представляет собой желтоватую поверхность (рис. 21.14), в инфракрасном излучении, которое проходит сквозь атмосферу, можно увидеть поверхность Титана в разных ракурсах. Атмосфера Титана очень массивная и содержит очень много газа, что создает большое давление (примерно в 2 раза больше, чем на Земле). Титан также единственное тело в Солнечной системе (кроме Земли), на поверхности которого есть обширные, заполненные жидкостью озера и моря (рис. 21.15).



Рис. 21.14. Инфракрасные и оптические фото Титана

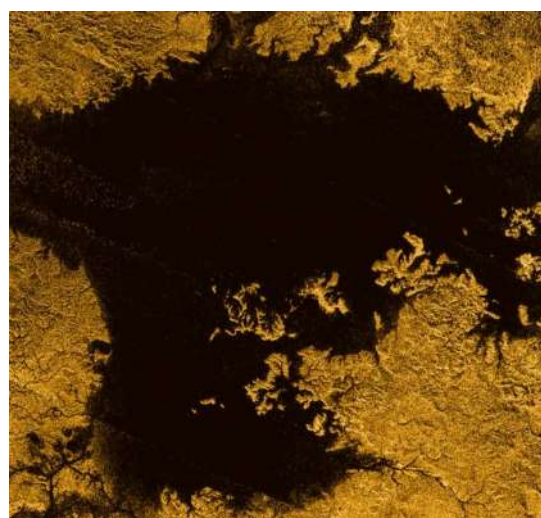


Рис. 21.15. Море Лигеи, 500 км

В 2005 году на поверхность Титана опустился космический аппарат «Гюйгенс» (рис. 21.16-21.17) – это единственный кадр, переданный аппаратом за 1 час 12 мин работы на поверхности Титана. До этого он 2,5 часа спускался в атмосферу на парашюте, передавая снимки облаков и ландшафта.

Поверхность Титана – это холодная, безжизненная поверхность; на фотографии отчетливо видны глыбы застывшего водяного льда. Атмосфера Титана состоит почти из чистого азота – это безопасная для человека атмосфера.

Расчеты показывают, что температура под поверхностью Титана выше, чем на поверхности – это характерно для любой планеты.



Рис. 21.16. Поверхность Титана в месте посадки аппарата «Гюйгенс» в 2005 г. Фотография при нормальном контрасте



Рис. 21.17. Поверхность Титана в месте посадки аппарата «Гюйгенс» в 2005 г. Фотография с усиленным контрастом

Малые спутники Юпитера и Сатурна

Большинство спутников планет – не такие крупные, как Луна или Титан. Они имеют неправильную форму, маленькую массу.



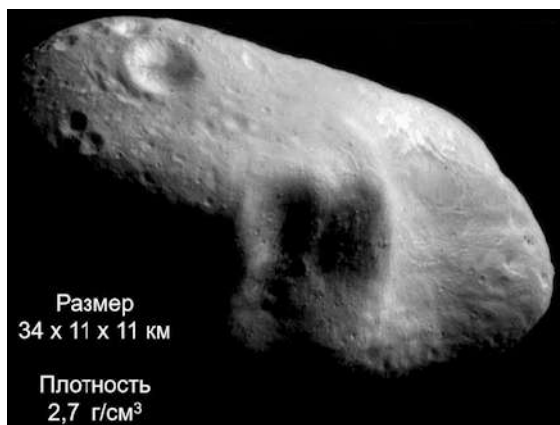
Рис. 21.18. Малые спутники Юпитера и Сатурна

21.2. Астероиды и кометы. Астероидно-кометная опасность

Астероиды

Астероиды – это, в основном, каменные объекты. Однако среди астероидов встречаются и металлические (железно-никелевые).

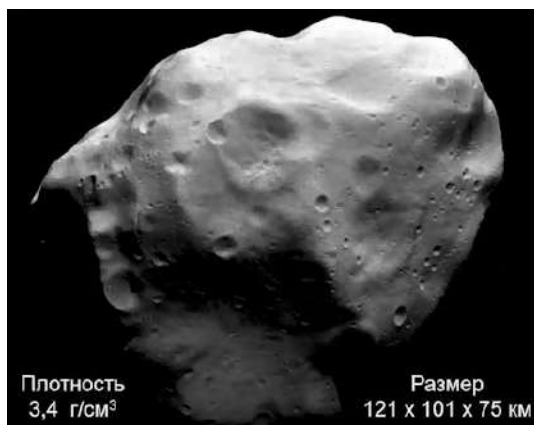
Хорошо-изученным астероидом является, например, астероид Лютеция (рис. 21.20). Средняя плотность астероида составляет $3,4 \text{ г/см}^3$, что соответствует плотности камня.



Размер
34 x 11 x 11 км

Плотность
2,7 г/см³

Рис. 21.19. Астероид Эрос



Плотность
3,4 г/см³

Размер
121 x 101 x 75 км

Рис. 21.20. Астероид Лютеция

Астероид Веста – это крупнейший астероид Главного пояса (пространство между Марсом и Юпитером) (рис. 21.22). Средний диаметр Весты – 525 км, а плотность составляет 3,5 г/см³. Вдоль экватора астероида просматриваются складки поверхности – это результат мощного удара, который отколол значительную часть вещества этого астероида. Осколки Весты довольно часто падают на Землю – ученые научились их идентифицировать по характерному светлому оттенку и своеобразному минеральному составу.

Главный пояс астероидов – область между орбитами Юпитера и марса – хорошо изучен, так как он находится сравнительно недалеко от Земли, поэтому точность телескопов позволяет изучать объекты от 1 км. В Главном поясе астероидов выявлено около одного миллиона тел.



Рис. 21.21. Астероид Веста

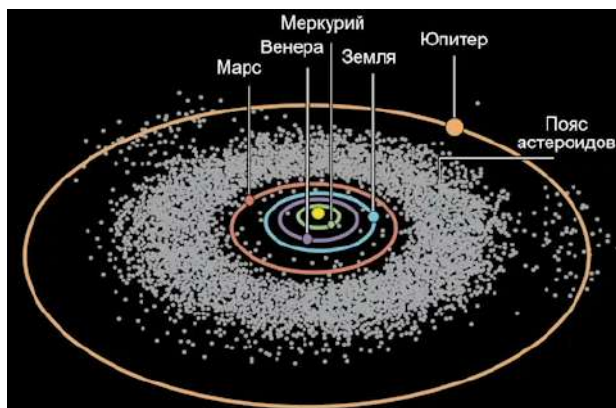


Рис. 21.22. Главный пояс астероидов

Кометы

Ядра комет – более рыхлые и льдистые объекты, богатые летучими веществами (водой, метаном, аммиаком). Ядра комет, как правило, летают далеко от Солнца, так как вблизи Солнца ядро кометы начинает испаряться.

Ядро кометы Чурюмова-Герасименко исследовано хорошо. Вокруг него летал космический аппарат, который пытался посадить на объект небольшой космический зонд. Однако зонд не смог закрепиться на освещенной Солнцем площадке.



Рис. 21.23. Комета Темпеля

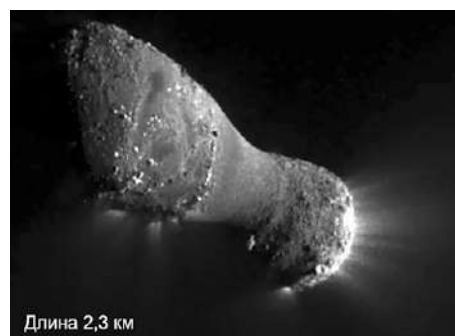


Рис. 21.24. Комета Хартли-2



Рис. 21.25. Комета Чурюмова-Герасименко

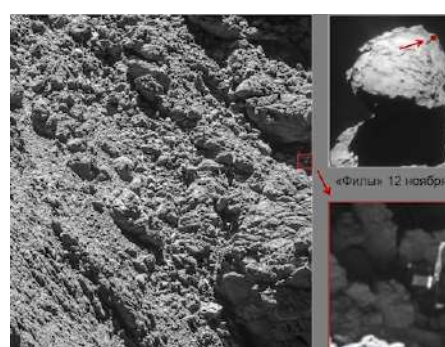


Рис. 21.26. Посадка на комету Чурюмова-Герасименко

Когда комета подлетает к Солнцу, то начинает испаряться и окутывает себя временной атмосферой (рис. 21.27). От давления солнечного света и солнечного ветра атмосферу отбрасывает назад и у кометы появляется два ярких хвоста: газовый (пламенный) хвост и пылевой хвост. Давление солнечного света ощущают твердые пылинки, и они уходят в одном направлении (пылевой хвост), а давление солнечного ветра ощущают ионизованные атомы газа – формируется плазменный хвост.

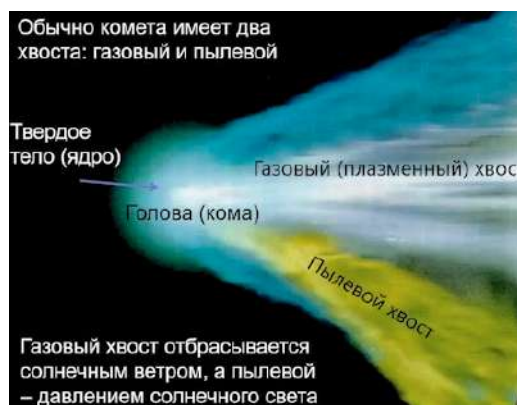


Рис. 21.27. Строение кометы

На рисунке 21.28 показана классическая комета – комета Хейла-Боппа. Комету было хорошо видно в 1995 году.

Стоит отметить, что двух одинаковых комет не бывает. Сколько комет – столько различных их проявлений.



Рис. 21.28. Комета Хейла-Боппа



Рис. 21.29. Комета Невский-Новичок (с одним хвостом)

Причина длительного сохранения льдов в ядре кометы – её сильно вытянутая орбита с афелием вдали от Солнца



Рис. 21.30. Комета Holmes

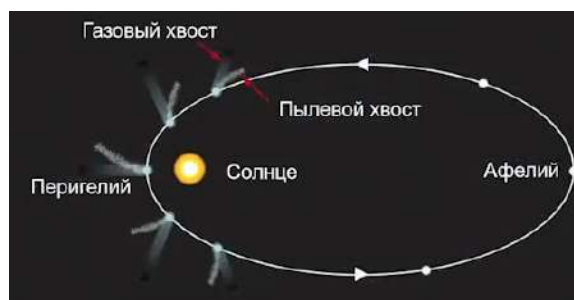


Рис. 21.31. Орбита кометы

На рисунке 21.32 показан наиболее точный рисунок того, как выглядит Главный пояс астероидов: основное вещество заключено между орбитами марса и Юпитера, но некоторая часть комет летает по орбите Юпитера: впереди него и позади него – это семейства «Греки» и «Троянцы», которые движутся вокруг Солнца практически с тем же периодом, как у Юпитера. Существует еще семейство «Гильды», имеющих период в $2/3$ раза короче, чем орбитальный период Юпитера – они движутся синхронно, но так, что астероиды совершают три оборота за то время, пока Юпитер совершает два оборота.

Космическая угроза

Космическая угроза для нашей планеты – астероиды и кометы.

Потенциально опасный космический объект – это астероид или комета диаметром более 100 м с орбитой, допускающей приближение к Земле на расстояние менее 0,05 а. е. (около 20 расстояний от Земли до Луны).

Астероиды, сближающиеся с Землёй – это астероиды с перигелийными расстояниями, меньшими или равными 1,3 а. е.

В обозримом будущем они могут приблизиться к Земле на расстояние, меньшее 0,05 а. е. и стать потенциально опасными.

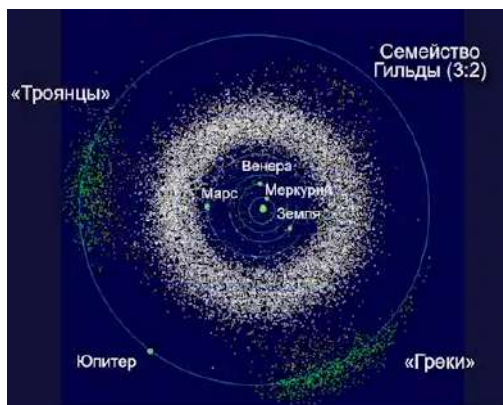


Рис. 21.32. Главный пояс астероидов

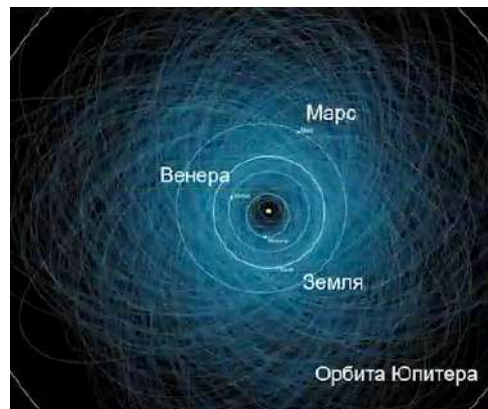


Рис. 21.33. Астероиды, пересекающие земную орбиту

Урок 22. Метеоры и метеориты. Происхождение планет

22.1. Метеороиды, метеоры, метеориты

Значительное количество мелких тел, прежде всего астероидов, периодически испытывают столкновение, так как их орбиты пересекаются. Столкновения астероидов порождают большое количество мелкого вещества, которое распыляется по Солнечной системе и эти осколки летят во всех направлениях, в том числе и в направлениях планет.

Рассмотрим Астероид Веста (рис. 22.2): снимок сделан со стороны южного полюса, где видно гигантский кратер, образовавшийся в результате столкновения с другим космическим объектом. Термин кратер лучше заменить словом *депрессия* (недостаток вещества), так как в результате удара от Весты откололось значительное количество вещества.

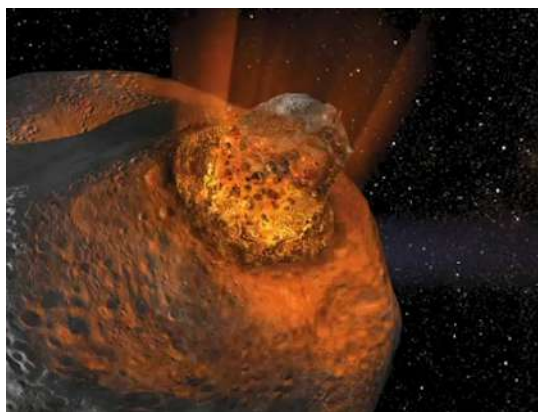


Рис. 22.1. Столкновение астероидов

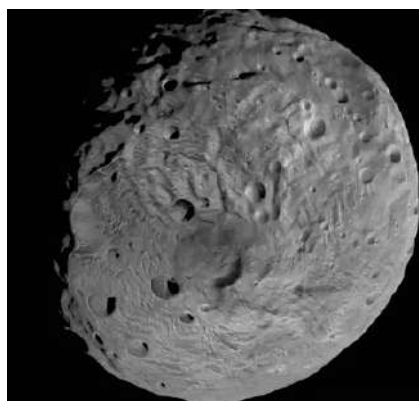


Рис. 22.2. Астероид Веста, область южного полюса

Ученые создают множество компьютерных моделей космических объектов, в том числе и комет (рис. 22. 3). Такое моделирование помогает исследовать ученым процесс потери вещества кометой: астероид может потерять вещество только от прямого удара, а ядро кометы теряет вещества, даже не испытывая ударов со стороны внешних тел – газ начинает испаряться под действием солнечного излучения.

Рассмотрим орбиту полета кометы (рис. 22.4) – она движется по вытянутой эллипсообразной орбите, и, пролетая Солнце, испаряется и выбрасывает мелкое вещество, которое продолжает движение по орбите исходного ядра и движется так же, как и само ядро.

Постепенно вдоль орбиты кометы собирается пояс мелкого раздробленного вещества (пылинок, камней, которые старая комета потеряла) (рис. 22.5). Такой пояс называется *метеорным роем*.

Если орбита Земли пересекается с орбитой кометы, то Земля на некоторое время попадает в пространство, заполненное мелкими пылинками.



Рис. 22.3. Компьютерное моделирование. Комета теряет вещество вблизи Солнца



Рис. 22.4. Разрушение кометы

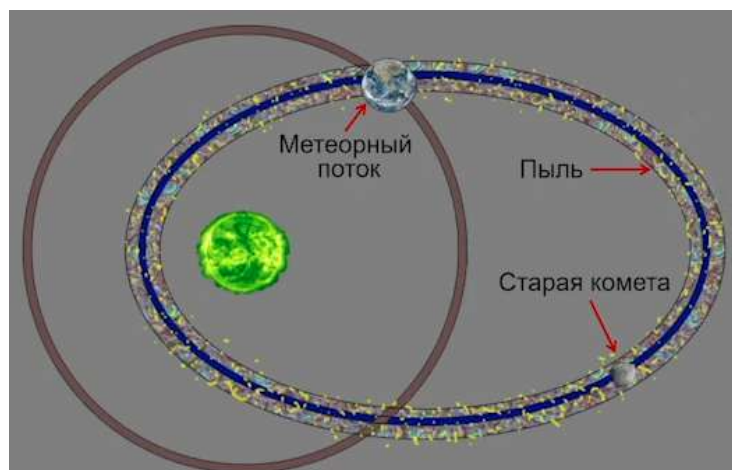


Рис. 22.5. Метеорный рой

Различие метеороида, метеора и метеорита

Метеороид – объект, находящийся в космосе.

Метеор – объект, разрушающийся в атмосфере Земли.

Метеорит – объект, достигший поверхности Земли.



Рис. 22.6. Метеорит



Рис. 22.7. Метеор

На фотографиях (рис. 22.8, 22.9) показаны вспышки метеоров в атмосфере планеты: иногда они с трудом различаются глазом, иногда яркие.



Рис. 22.8. Вспышка метеора



Рис. 22.9. Вспышка метеора

Болид – чрезвычайно яркий метеор. Отличие болида от метеора астрономами определяется следующим образом: если вспышка ярче, чем изображение Венеры, то метеор считается болидом.

Расчеты показывают, что такую яркую вспышку болида часто производят метеоры размером меньше наперстка, а обычную вспышку метеора производит частица, размером с крупинку песка. Энергия на такую мощную световую энергию берется за счет огромной скорости (как минимум, второй космической, а максимум до 70 км/с), с которой эти частицы влетают в атмосферу Земли. С такой скоростью кинетическая энергия песчинки – велика.

15 февраля 2013 г. в 9:20 местного времени (UTC+6) наблюдался Челябинский суперболид, который был вызван разрушением метеороида диаметром около 20 метров (масса около 13 тыс. т), влетевшим в атмосферу Земли со скоростью 19 км/с, и закончился выпадением на землю метеоритного дождя.

После падения метеорита на Земле остается множество его осколков (рис. 22.11).



Рис. 22.10. Болид



Рис. 22.11. Каменный метеорит

На фотографии (рис. 22.12) показан метеорит каменного состава. Как правило, метеориты имеют каменный состав и только изредка – металлический. Метеориты металлического состава лучше сохраняются на поверхности Земли и их легче найти.

Падая с большой скоростью, камень ударяется по поверхности Земли и часть коры плавления откалывается (рис. 22.13). На месте скола можно увидеть минеральную породу, которую не затронула высокая температура.



Рис. 22.12. Метеорит каменного состава. Северо-Африканская пустыня



Рис. 22.13. Каменный метеорит

Метеориты другого типа – *железные* (рис. 22.14, 22.15). В 1947 году на территории дальнего Востока упал довольно крупный железный метеорит, который раскололся на множество осколков. Внешне осколок похож на кусочек пластилина, в котором словно пальцем сделаны углубления. На самом деле, эти углубления создала атмосфера Земли: металл легко плавится, поэтому горячий воздух, набегая на поверхность этого тела, выдавливает и испаряет небольшие углубления.

Самый крупный на Земле из найденных железных метеоритов (рис. 22.15) находится на юге Африки находится на частной территории. Ее владелец оформил своеобразный лекторий/зал для путешественников и туристов.



Рис. 22.14. Сихотэ-Алинский железный метеорит, 1947 г.



Рис. 22.15. Железный метеорит Гоба, 60 т, Ю.-З. Африка

Повреждения, нанесенные метеоритами

Иногда так получается, что метеориты падают в густонаселенные районы/города и наносят повреждения. Типичный пример: 9 октября 1992 года над восточными штатами США пролетел метеорит и ударил в багажник старого автомобиля (рис. 22.16). Для хозяйки автомобиля падение метеорита оказалось прибыльным событием.

Крупные метеориты могут оставить на Земле огромные кратеры – удар происходит с такой скоростью, что кинетическая энергия превосходит метеорита намного превосходит, например, энергию взрыва взрывчатки той же массы.

Самый известный кратер – Аризонский (рис. 22.17). Его диаметр – 1 км, глубина примерно 200 м. Размер кратера, как правило, в 20 раз больше размера того метеорита, который его произвел. Проведя несложные расчеты, можно вычислить, что кратер глубиной в 200 м оставил метеорит диаметром 50 м. Кратеру около 50 тыс. лет.



Рис. 22.16. Повреждения от падения метеорита 9 октября 1992 г.



Рис. 22.17. Аризонский метеоритный кратер

Территория нашей страны – большая. Естественно, на нее довольно часто падают метеориты и ядра комет. В 1908 году в Сибири в районе реки Подкаменная Тунгуска что-то упало. В этих болотистых местах ни тогда, ни сейчас практически никто не живет. Однако люди видели полет в атмосфере крупного тела, тепловой взрыв, который привел к тому, что на огромной территории в 2000 км² «полегла» тайга (рис. 22.18). К сожалению, это место стали использовать только спустя 20 лет.

Интересно то, что часто упоминается «тунгусский метеорит», однако метеорит найден не был – никаких следов тела, кроме незначительных частиц в грунте.

Единственное предположение, которое может объяснить этот факт, что упало на Землю – ядро кометы.

В наше время в 2013 году над Челябинском пролетел крупный каменный метеорит диаметром 17 м (рис. 22.19).



Рис. 22.18. Тунгусское явление, 1908 г.



Рис. 22.19. Разрушения от
Челябинского суперболида

Через несколько минут после пролета тела пришла ударная волна, причинившая заметные разрушения (рис. 22.20, 22.21).



Рис. 22.20. Ударная волна после падения
метеорита



Рис. 22.21. Разрушения от
челябинского суперболида

22.2. Происхождение и эволюция планетных систем

Между звездами – не вакуум. Межзвездное пространство заполнено разреженным веществом.

Этапы формирования планет.

Этап 1. В недрах охлажденных межзвездных облаков при низком давлении газа гравитация начинает сжимать во все более плотные ядра, тогда самая плотная часть сжимающегося облака, постепенно разогреваясь становится звездой (рис. 22.23).

Этап 2. Когда звезда приобрела звездообразную форму, вещество продолжает падать и постепенно формирует диск вокруг звезды.

Этап 3. Формирование газо-пылевого диска (протопланетный диск).

Этап 4. Вещество собирается в отдельные плотные объекты, которые в будущем станут планетами.



Рис. 22.22. Межзвездное пространство



Рис. 22.23. Этапы формирования планет

Протопланетный газопылевой диск долгое время оставался лишь представлением ученых.

Изображение (рис. 22.25) получено при наблюдениях в субмиллиметровом диапазоне, при угловом разрешении $0,035''$.

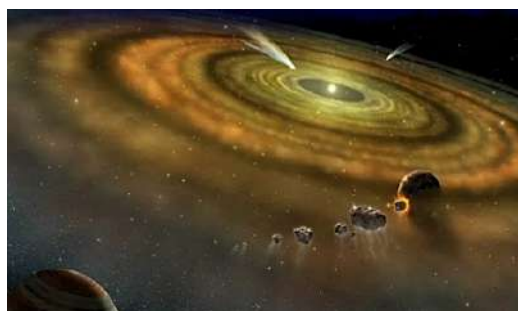


Рис. 22.24. Протопланетный диск

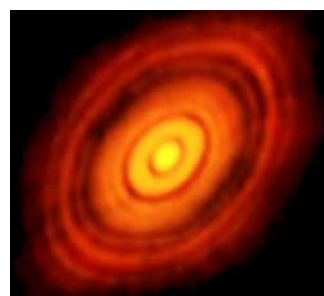


Рис. 22.25. Протопланетный диск вокруг звезды HL Тельца

Процесс гравитационной аккреции пока можно представить только теоретически: мелкие пылинки и атомы газа слипались (коагуляция), когда их размер достиг сотен метров и километров – гравитация стала их притягивать к себе.

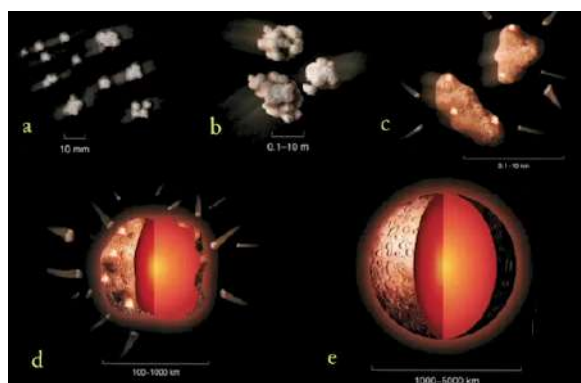


Рис. 22.26. Коагуляция и гравитационная аккреция

Ранняя эволюция Солнечной системы

Расположение, а возможно, и количество планет в Солнечной системе не всегда было таким. Сегодня мы видим лишь то, что осталось в результате «естественного отбора»

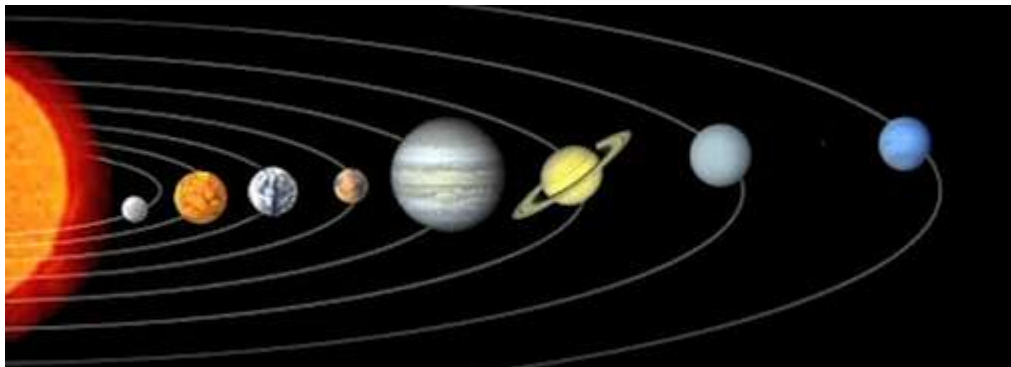


Рис. 22.27. Солнечная система

Период хаоса в Солнечной системе

Эпоха поздней массовой бомбардировки планет и спутников: 4,1-3,8 млрд лет назад. Это видно и на примере Луны: в основном ее кратеры сформировались в ту эпоху.



Рис. 22.28. Бомбардировка планет и спутников



Рис. 22.29. Кратеры Луны

На периферии Солнечной системы большие планеты не могли сформироваться (рис. 22.30):

Планета-карлик: каменная $D > 900$ км, ледяная $D > 400$ км В 2019 г. Их существует 5: Церера, Плутон, Эрида, Макемаке и Хаумеа. По расчетам Майка Брауна (Mike Brown) всего в Солнечной системе их:

- 10 – как минимум;
- 26 – весьма вероятно;
- 49 – вполне вероятно;
- 86 – возможно;
- 371 - не исключено.

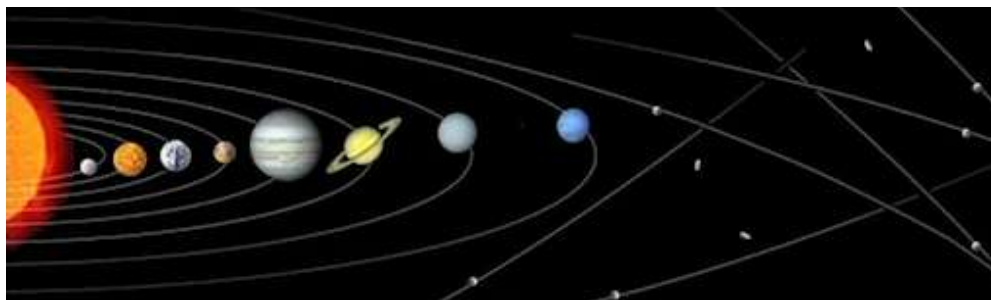


Рис. 22.30. Семейство карликовых планет

Спутники планет

Формирование спутников крупной планеты повторяло в миниатюре формирование Солнечной системы в целом.

Некоторые спутники формировались вместе с планетой, другие были захвачены ею позже.

Урок 23. Звезды: характеристики и внутреннее строение

23.1. Основные измеримые характеристики звезд: масса, радиус, светимость, температура и химический состав поверхности

Свет звёзд – основной источник информации о Вселенной. Эту информацию астрономы получают с помощью крупнейших телескопов, внутри которых работает самый важный астрофизический прибор – астрограф.



Рис. 23.1. Звёздное небо

Астрограф позволяет расщепить звездный свет на отдельные цвета.

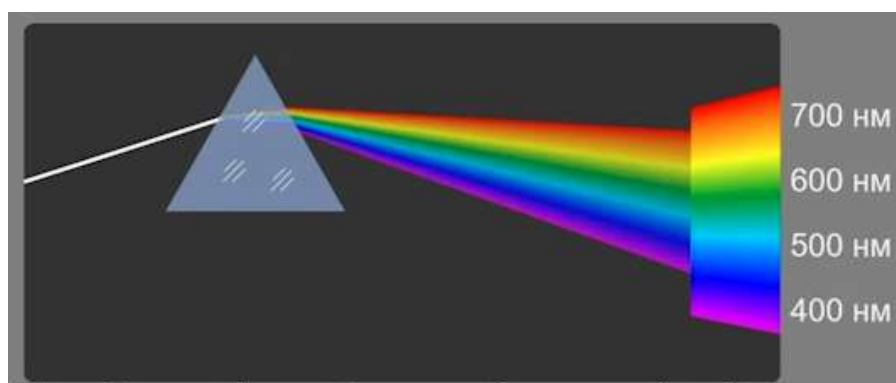


Рис. 23.2. Анализ энергии фотонов

Внутри звездного спектра видны ярко отмеченные темные линии поглощения.

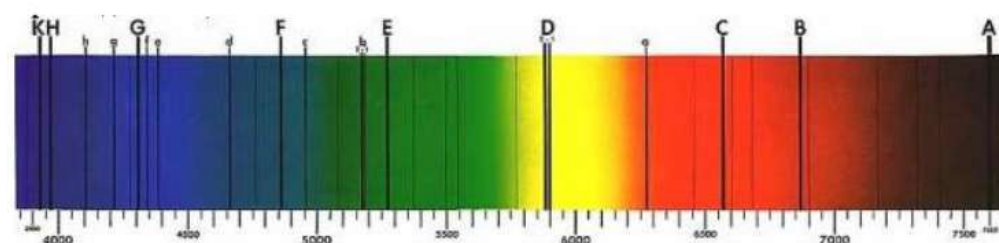


Рис. 23.3. Спектр Солнца

Общее распределение энергии в спектре звезды (рис. 23.4) говорит о многом: прохладные звезды имеют максимум в излучении, сдвинутый в красную область, звезды более теплые (например, Солнце) имеют максимум излучения в желто-зеленой области спектра, т.е. большинство квантов приходит в этом диапазоне спектра звезды. У более горячих звезд максимум спектра сдвинут в голубую область.

Свет, падающий на планету, частично ей отражается, частично поглощается и превращается в тепло и нагревает поверхность планеты. Поэтому спектр планеты (рис. 23.5) имеет два максимума: один максимум соответствует отраженному свету, т.е. практически повторяет спектр звезды (в нашей Солнечной системе – это спектр Солнца), вторая часть света доходит до поверхности и поверхность начинает излучать сама.

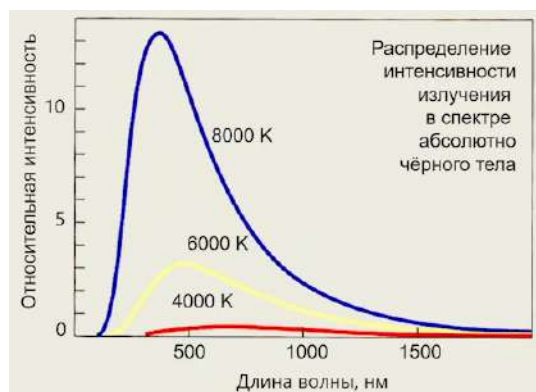


Рис. 23.4. Общее распределение энергии в спектре

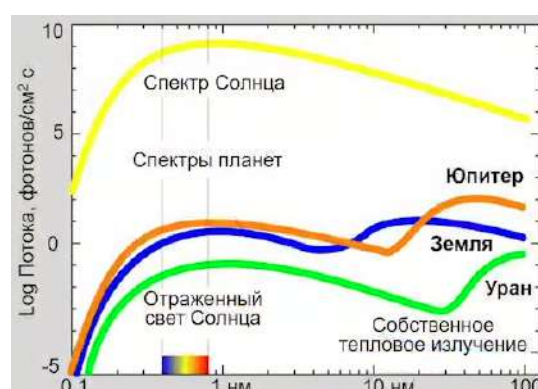


Рис. 23.5. Спектр звезды и соседних объектов

Линии в спектре как указатель химического состава.

Линии излучения или поглощения в спектре звёзды позволяют определить её химический состав. А тонкий анализ формы и интенсивности линий позволяет узнать значения многих физических параметров атмосферы звезды.

В начале 20 века астрофизики заблуждались в понимании того, что чем заметнее линии в спектре химического элемента, тем больше этого элемента в атмосфере звезды. Но это не так.

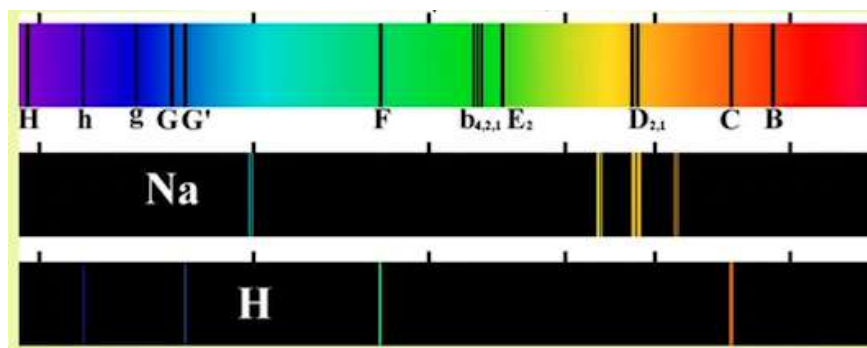


Рис. 23.6. Спектр Солнца

По законам квантовой механики: химический элемент может излучать и поглощать в зависимости от того, какая температура газа. Дело в том, что линии водорода характерны для возбужденных атомов водорода: когда электрон находится не на основном, а на первом возбужденном уровне. А при температуре солнечной поверхности, водород редко возбужден в такой степени. У более горячих звезд линии водорода представлены более заметно.

Все это позволило более точно определить химический состав атмосферы звезд.

Химический состав звезд.

У Солнца и большинства звезд: $\frac{3}{4}$ массы составляет водород и еще $\frac{1}{4}$ – гелий, малую часть занимают другие газы (рис. 23.7). У астрономов принято все элементы сложнее гелия называть металлами.

Эффект Доплера в спектре звезды.

Положение спектральных линий точно указывает на движение звезды: и ее перемещение в пространстве, и смещение оси. При удалении источника линии в его спектре смещаются в красную сторону, т. е. их длина волны увеличивается.



Рис. 23.7. Состав Солнца (по массе)

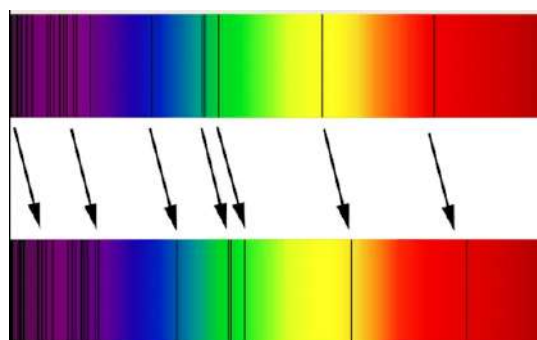


Рис. 23.8. Эффект Доплера в спектре звезды

Орбитальное движение звёзд вызывает периодическое смещение линий в их спектрах. В спектре двойной звезды обычно доминируют линии более яркого светила.

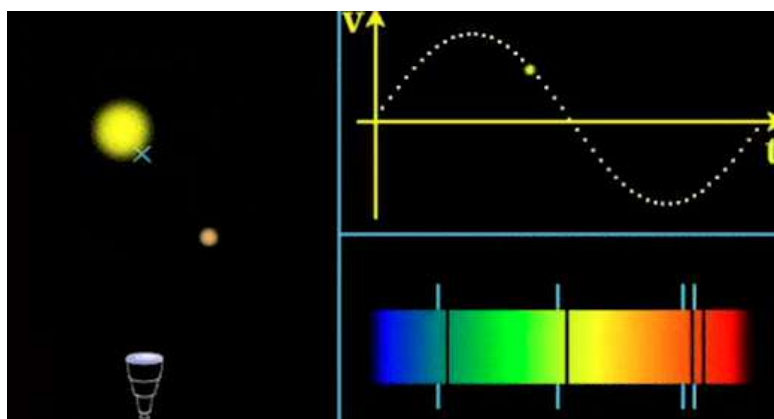


Рис. 23.9. Эффект Доплера

Благодаря эффекту Доплера можно получить информацию об одиночной звезде, например, о ее вращении. По доплеровскому расширению можно судить о скорости вращения звезды.

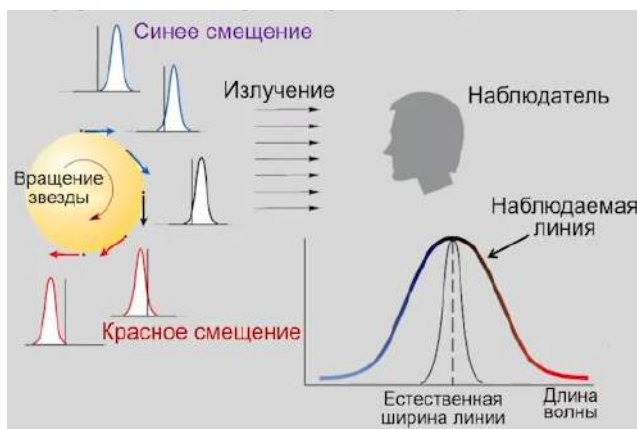


Рис. 23.10. Вращение звезды

Яркость звезд

Яркость звезд – очень важный параметр. Раньше ее измеряли с помощью фотопластинки, потом с помощью фотоэлектронных умножителей. Современные ПЗС-матрицы позволяют астрономам получить не только яркость, но и изображение.

Затменная переменная звезда

Большая роль принадлежит двойным звездным системам.

Тройная звезда Алголь (β Персея). Два её компонента, - Алголь А и В, - образуют тесную двойную систему, демонстрирующую затмения с периодом 2,87 суток.

Изображение двойной звезды получено в ближнем ИК-диапазоне интерферометром CHARA (Center for High Angular Resolution Astronom) на обсерватории Маунт-Вильсон (C1 Угловое разрешение 0,0005", что в 200 раз лучше, чем у телескопа «Хаббл»).

На рисунке 23.12 показано моделирование, когда одно светило проходит на фоне другого, т.е. когда орбитальная плоскость направлена на наблюдателя.

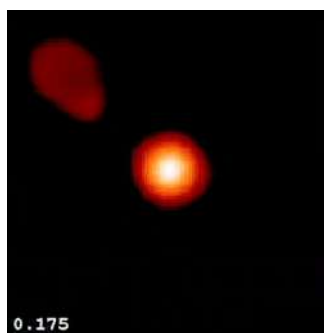


Рис. 23.11. Тройная звезда
Алголь (β Персея)

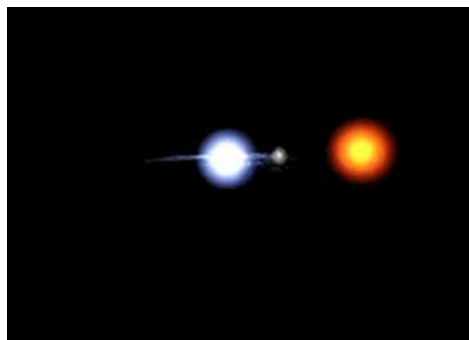


Рис. 23.12. Двойная звезда Алголь АВ в
представлении художника

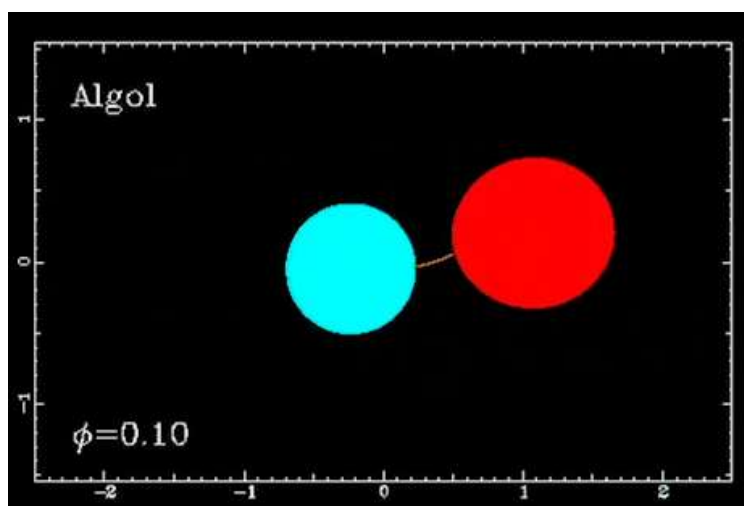


Рис. 23.13. Двойная звезда Алголь АВ. Рабочая модель

В тесной двойной системе две звезды видны в телескоп как одна звезда. Но их взаимные затмения очень полезны.

По кривой блеска можно определить орбитальный период форму орбиты, относительные размер и температуру звёзд, а иногда даже форму их поверхности.

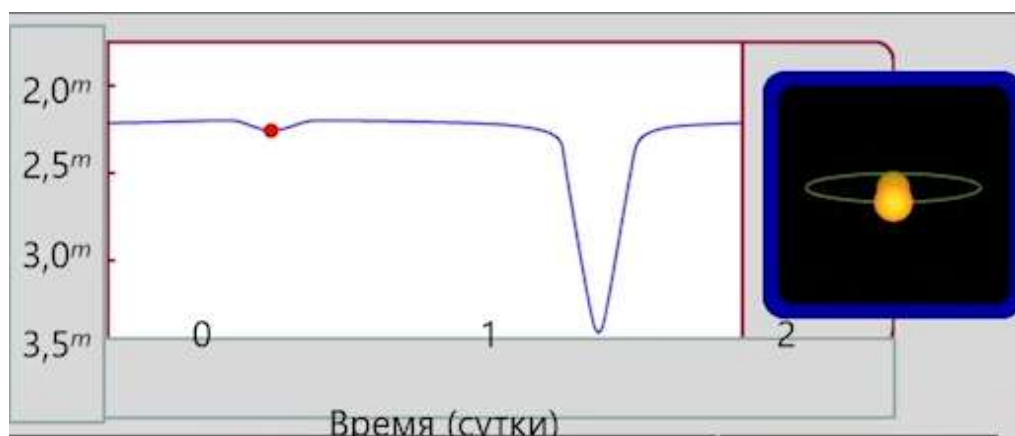


Рис. 23.14. Кривая блеска

Массы и размеры нормальных звёзд

Характеристики звезд чрезвычайно разнообразны.

Масса – главная характеристика любой звезды. В сравнении с Солнцем бывают звезды значительно менее массивные и много более массивные. В астрономии принято массу всех звезд представлять в виде единиц масс Солнца:

Масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг = 333 000 масс Земли.

Размеры звезд также разнообразны. В одном масштабе невозможно представить все многообразие размеров (рис. 23.17).

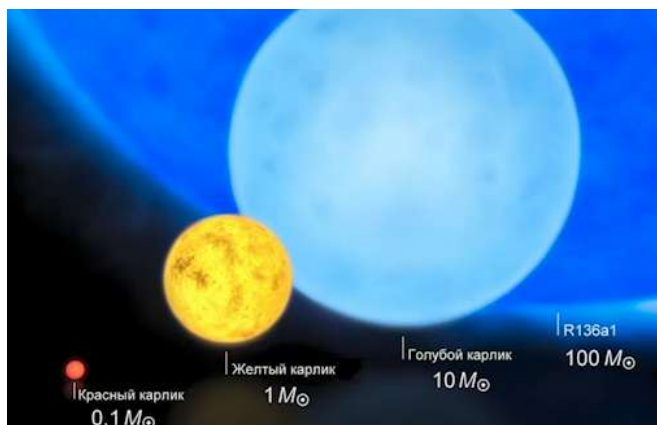


Рис. 23.15. Масса звезд

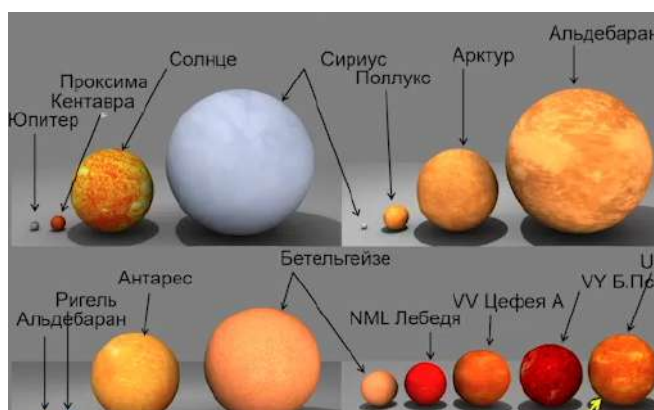


Рис. 23.16. Размеры звезд

Иногда крупные звезды удастся разрешить, т.е. увидеть детали их поверхности. В настоящее время телескоп «Хаббл» позволяют увидеть реальный размер Бетельгейзе (рис. 23.17).

С помощью некоторых наземных инструментов (систем оптических интерферометров), которые имеют разрешение до сотых долей угловой секунды, можно различить на Бетельгейзе более горячие и более холодные области.

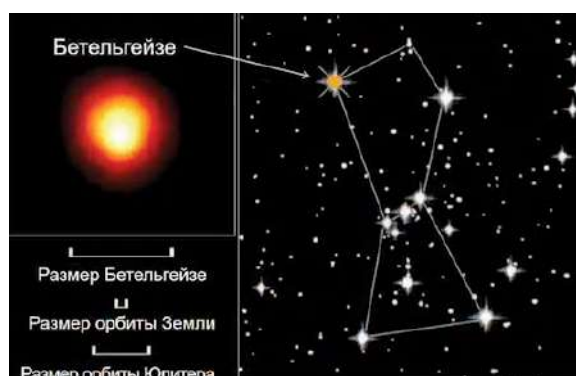


Рис. 23.17. Звезда Бетельгейзе

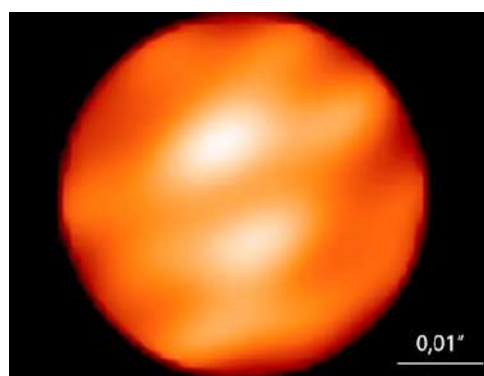


Рис. 23.18. Звезда Бетельгейзе

Светимость звезд

Самая разнообразная характеристика звёзд — мощность их излучения — *светимость*.

Ближайшая звезда *Proxima Cen* = 1/600 светимости Солнца.

Существует гигантская звезда R136a1, светимость которой равна 8.7 миллионов светимости Солнца.



Рис. 23.19. Красный карлик *Proxima Cen*



Рис. 23.20. Светимость звезд

23. 2. Внутреннее строение и источники энергии звезд. Нейтринная астрономия

С помощью оптического телескопа заглянуть в недра звезд невозможно. Но есть методы, которые позволяют это сделать.

Солнце является самой изученной звездой, так как все остальные находятся далеко. Прежде всего, приходится теоретически строить математические модели.

Гидростатическая модель звезды.

В стационарном состоянии вес элемента объема уравнивается за счет разности давления в соседних слоях звезды.

А потеря энергии (в виде излучения) с поверхности компенсируется её переносом из недр наружу разными способами.

На графике (рис. 23.22) можно проследить, как в недрах Солнца от его центра к поверхности изменяется плотность, температура, доля массы, заключенная в данном радиусе и светимость (мощность, которая генерируется внутри Солнца).

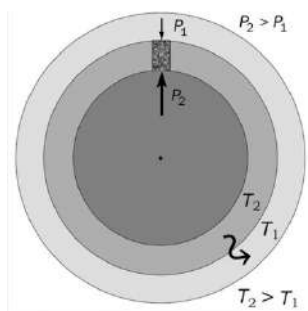


Рис. 23.21. Гидростатическая модель звезды

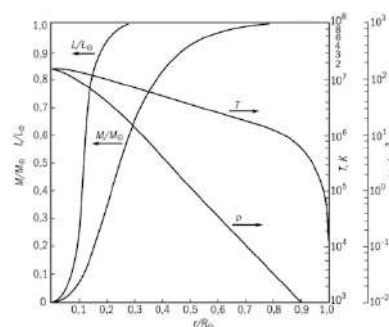
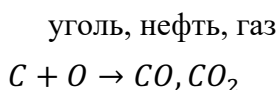


Рис. 23.22. Теоретическая модель Солнца

Источники энергии звезд (горение)

Раньше химики и физики могли рассуждать только химических реакциях, которые приводят к выделению тепла. Рассмотрим химическую реакцию (горение):



Время химического горения Солнца – полный запас химической энергии внутри Солнца:

$$t = \frac{QM_{\odot}}{L_{\odot}} = 3000 \text{ лет}$$

где $L_{\odot} = 2 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$, $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$.

Запаса энергии на 3000 лет свечения – крайне мало. Таким образом, ученые выяснили, что не химические реакции питают Солнце энергией.

Источники энергии звезд (гравитация)

Также ученые считали, что свечение Солнца может обеспечивать гравитационная энергия.

Работа силы тяжести:

$$E = mgh \\ g = \frac{GM}{R^2}$$

При сжатии тело падает «само на себя»:

$$m \rightarrow M, h \rightarrow R$$

Зная массу тела, можно посчитать гравитационную энергию связи:

$$U = \frac{GM^2}{R}$$

Таким образом, *время высвечивания гравитационной энергии Солнца:*

$$t = \frac{GM_{\odot}^2}{2R_{\odot}L_{\odot}} = 30 \text{ млн лет}$$

Значит запаса гравитационной энергии хватит примерно на 30 млн лет. В середине 19 века было предположение, что именно сжатие звезд питает их энергией. Но уже в тот момент геологи сомневались в этой теории.

С появлением датирования земных пород радиоактивными методами, стало понятно, что возраст Земли – это миллиарды лет. Значит и возраст Солнца должен составлять миллиарды лет.

Источники энергии звёзд (синтез $4H \rightarrow He$).

Ученые стали выяснять, можно ли синтез из легких элементов более тяжелых элементов приводить к энергии.

Сближению протонов (ядер водорода) мешает их взаимное электрическое отталкивание (F). Чтобы его преодолеть, нужно разогнать протоны до высокой скорости (V), т. е. нагреть газ до очень высокой температуры.

Расчёты показали, что такой высокой температуры в недрах Солнца не может быть.

В 1928 г. физики обнаружили в рамках квантовой механики *туннельный эффект*: частица может пройти сквозь потенциальный барьер, не преодолевая его.

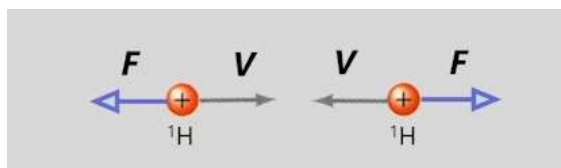


Рис. 23.23. Синтез ядер химических элементов

Рис. 23.24. Иллюстрация к явлению туннельного эффекта

Благодаря этому явлению, физики поняли, как в недрах звезд легкие атомы превращаются в более сложные с выделением энергии.

В недрах Солнца протоны (ядра атома водорода) соединяются в более сложные частицу – тяжелый изотоп водорода (дейтерий). В момент столкновения один из протонов превращается в нейтрон, при этом свой электрический заряд он выбрасывает в виде позитрона (античастица электрона), который находит частицу электрона – происходит аннигиляция и уничтожение друг друга и превращение в электромагнитные кванты. Превращение протона в нейтрон выделяет из этой реакции легкую частицу – *нейтрино*.

На втором этапе должно было случаться слияние двух ядер дейтерия в сильно связанное ядро гелия. Но этой реакции практически не происходит, т.к. частицы одинаковые и их сближение не приводит к выделению энергии связи.

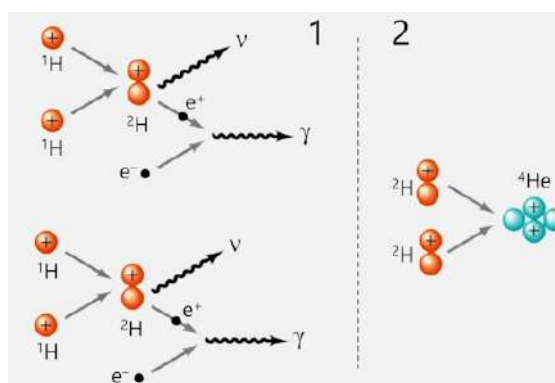


Рис. 23.25. Первый этап синтеза

На самом деле в недрах Солнца к ядру дейтерия подлетает еще один протон и, соединившись с ним, превращает ядро дейтерия в ядро легкого изотопа гелия. Тогда, сближаясь друг с другом, они могут соединиться в ядро ^4He , а избыток энергии выбросить в виде двух быстро движущихся протонов.

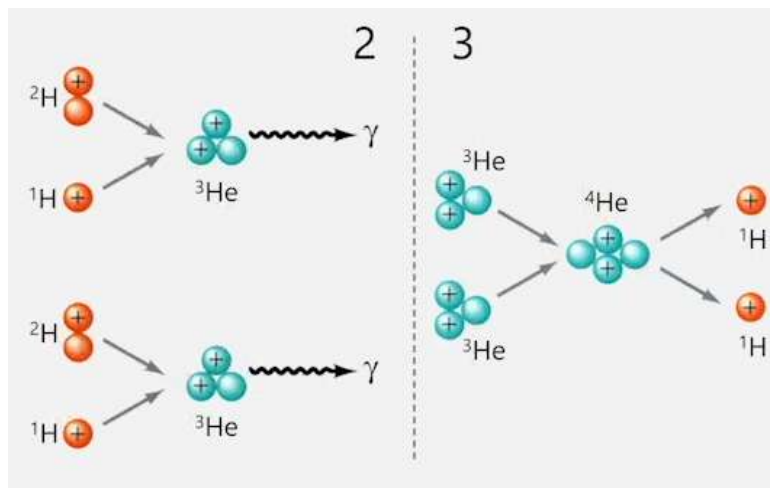


Рис. 23.26. Второй этап синтеза

Таким образом, выделяется энергия в звездном ядре и постепенно проходит к поверхности в виде электромагнитных квантов.

Солнечные нейтрино.

Нейтрино, рожденные на первом этапе синтеза, слабо взаимодействуют с веществом и свободно, проходя сквозь Солнце, уносятся в космическое пространство.

Pp-нейтринная светимость:

$$\frac{dN_\nu}{dt} = \frac{2L}{26,7} \text{ МэВ} \sim 2 \cdot 10^{38} \text{ с}^{-1}$$

Поток *pp*-нейтрино на Земле:

$$F \sim 2 \cdot \frac{10^{38}}{4\pi} (a.e.)^2 \sim 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

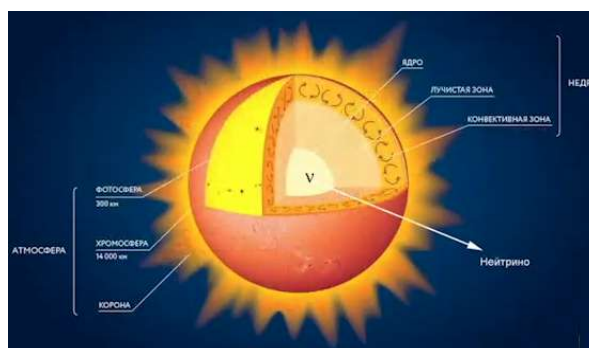


Рис. 23.27. Перенос энергии в недрах звезд

Нейтринная астрофизика

Для захвата нейтрино приходится конструировать огромные детекторы (рис. 23.28). Его *параметры*:

- Глубина: 1,5 км;
- Объем: 380 тыс. л.;
- Вещество – тетрахлорэтилен C_2Cl_4 ;

Авторы: Раймонд Дэвис и др. (1968-96).



Рис. 23.28. Хлорный детектор солнечных нейтрино (Хоумстейк, Ю. Дакота)

При конструкции других «ловушек» для нейтрино использовали огромные объемы океанской воды, куда помещали детекторы света. Ученые исходили из того факта, что нейтрино, летящее через толщу воды иногда выбивает из молекулы атомов воды – электроны, которые быстро начинают двигаться и вызывают слабую вспышку света (*черенковская вспышка света*), которую регистрируют детекторы.

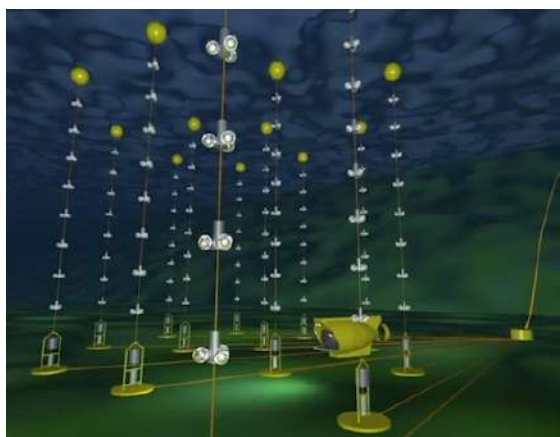


Рис. 23.29. Детекторы света



Рис. 23.30. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп. Оптический модуль (ФЭУ)

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD (2021 г.) – детектор для исследования природного потока нейтрино высоких энергии. Пройдя сквозь толщу Земли, нейтрино может с некоторой вероятностью провзаимодействовать

в воде озера Байкал и породить каскад заряженных частиц. Черенковский свет от заряженных частиц распространяется в воде озера и регистрируется оптическими модулями.

Аналогичный нейтринный детектор соорудили на южном полюсе – в Антарктиде (рис. 23.32). В качестве ловушки для нейтрино используется замерзшая вода.



Рис. 23.31. Байкальский подводный нейтринный телескоп объёмом

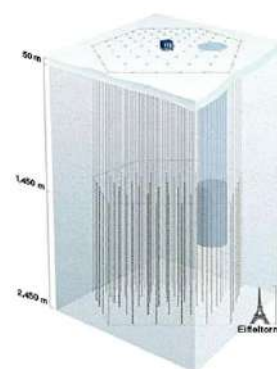


Рис. 23.32. Нейтринный детектор на южном полюсе (Антарктида)

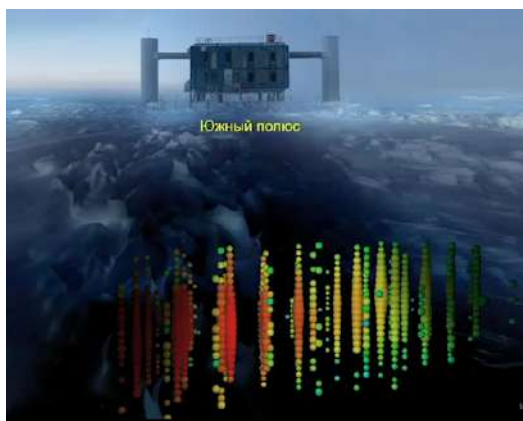


Рис. 23.33. IceCube смотрит вниз, сквозь тело Земли, на северное небо

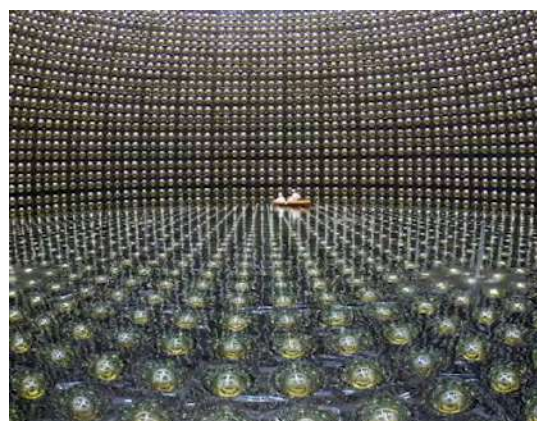


Рис. 23.34. Детектор нейтрино в Японии

Нейтринный телескоп Японии позволил получить изображение Солнца.

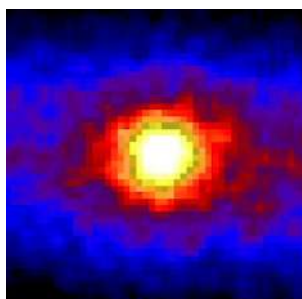


Рис. 23.35. Изображение Солнца, полученное нейтринным телескопом Суперкамиоканде (Япония, 1998 г.). Экспозиция 500 суток

Урок 24. Солнце

24.1. Солнце – опасная звезда

Изучая Солнце, астрономы поняли, каков источник энергии в недрах звезд – термоядерные реакции.

Солнце и его влияние на Землю

Во время изучения Солнца необходимо быть крайне аккуратным, т.к. Солнце – это мощный источник света. Солнце – это гигант, в котором сосредоточена почти вся масса Солнечной системы (рис. 24.1) и который излучает практически всю энергию, освещающую и нагревающую планеты в нашей солнечной системе.

При наблюдениях за Солнцем обязательно нужно использовать специальные солнечные очки (рис. 24.2). Обычные солнцезащитные очки для наблюдений за Солнцем не подходят, так как они недостаточно поглощают солнечный свет. У специальных очков присутствует тонкая лавсановая пленка покрыта слоем металла, которая пропускает лишь 0.00001 долю света. Такой ослабленный свет не повредит глазам.



Рис. 24.1. Солнце – мощный источник света



Рис. 24.2. Защита глаз от солнечных лучей

Еще более опасно смотреть на Солнце напрямую в телескоп. Для таких наблюдений необходимо применять специальные оптические механизмы, которые отбрасывают почти весь собранный телескопом свет в сторону, а в окуляр отправляет незначительную часть света, которого достаточно, чтобы увидеть поверхность Солнца, но не повредить зрение.



Рис. 24.3. Наблюдение за Солнцем в телескоп



Рис. 24.4. Окуляр Гюйгенса телескопа

Однако, если часто смотреть в окуляр на Солнце, то это вредит зрению.

Телескоп, зрительную трубу и даже бинокль (закрыв у него один объектив) – всё можно использовать для наблюдений.



Рис. 24.5. Изображение на экране луча света, пропущенного через телескоп



Рис. 24.6. Изображение на экране луча света, пропущенного через телескоп

Даже без оптических приборов можно получить изображение Солнца на экране: для этого в небольшой прозрачной пластинке необходимо проткнуть маленькое отверстие (диаметром 1-2 мм). Тогда можно получить камеру обскура: солнечный луч пройдет через отверстие и на экране будет изображение Солнца.



Рис. 24.7. Изображение на экране луча света, пропущенного через телескоп

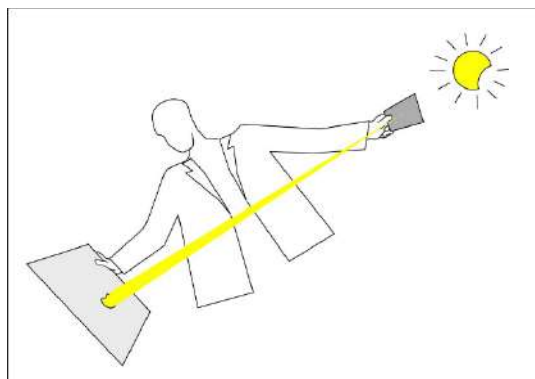


Рис. 24.8. Наблюдение Солнца на экране

Солнечные пятна и вращение Солнца

Астрономы редко смотрят глазом на Солнце, а, в основном, фотографируют с помощью фотокамеры, приспособленной в телескопе. Обычно, с поверхности Земли можно получить белые изображения солнечного диска (рис. 24.9, 24.10). Иногда на этих изображениях видны небольшие пятна – это области чуть более прохладные: обычная температура солнечной поверхности около 6000 К, температура солнечных пятен – около 4500 К.

При длительной съемке можно следить за перемещением солнечных пятен. Таким образом, можно измерить скорость вращения Солнца.

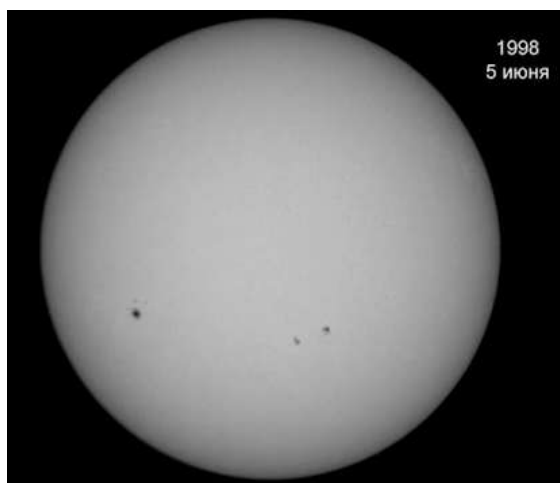


Рис. 24.9. Изображение Солнца и солнечных пятен (черные точки)

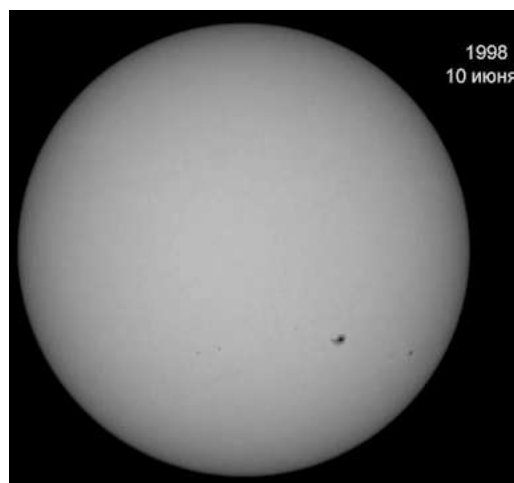


Рис. 24.10. Изображение Солнца и солнечных пятен (черные точки)

Внутреннее ядро звезд позволяет протекать там термоядерным реакциям. Выходящая оттуда энергия постепенно просачивается к поверхности звезды. В областях высокой температуры и большой плотности излучения, кванты переносят энергию сквозь плотную солнечную плазму.

В верхних слоях звезды свет – недостаточно горячий и его кванты не могут вынести энергию, поэтому они подогревают слои солнечного тела и там начинается процесс конвекции.

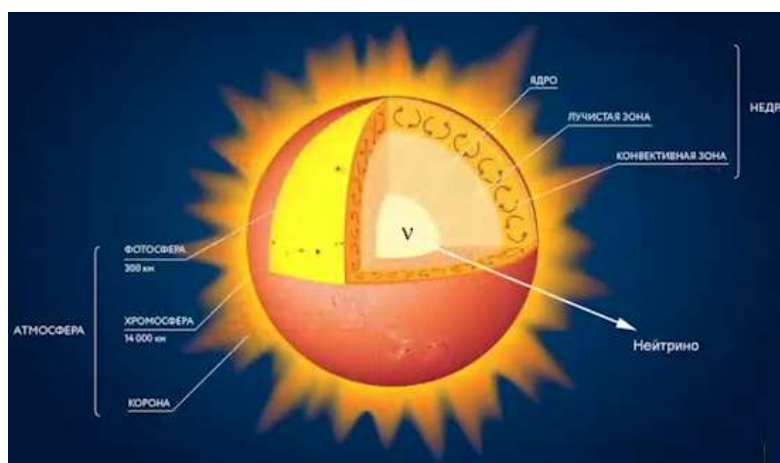


Рис. 24.11. Строение Солнца

Ученые создали 3D гидродинамическую модель кипения вещества (рис. 24.12) вблизи поверхности вещества. Вещество разбивается на ячейки, т.н. *ячейки Бенара*, где в центральной части поднимается горячий поток, а затем охладившись опускается в периферийной части.

Солнечные пятна – активные области звезды. Температура поверхности Солнца составляет около 6000 К. Температура пятна около 5000 – 4500 К. У звезды присутствует сильное (~ 1 Тл) магнитное поле. Гранулы (1000 км) – проявление конвекции (бурления).

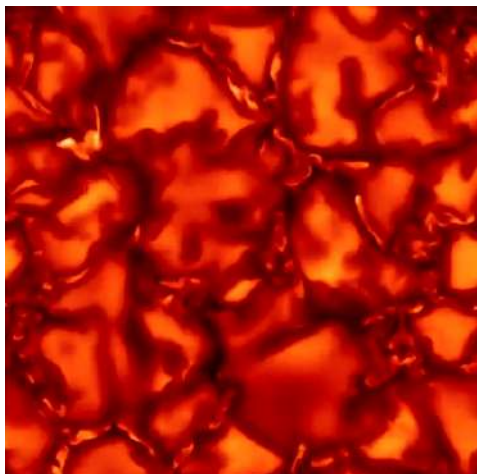


Рис. 24.12. 3D гидродинамическая модель кипения вещества

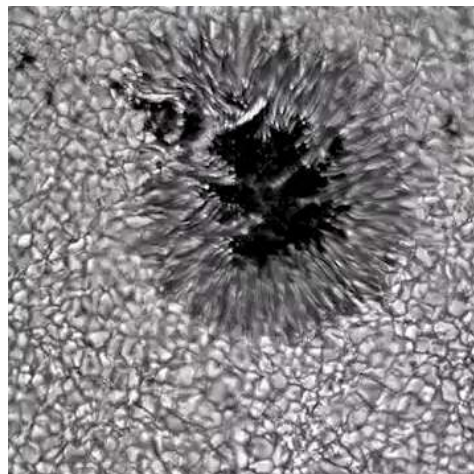


Рис. 24.13. Кипящая поверхность Солнца

Астрономам не сразу была понятна причина образования солнечных пятен. Главной причиной их образования являются магнитные поля. Любая звезда является носителем магнитного поля.

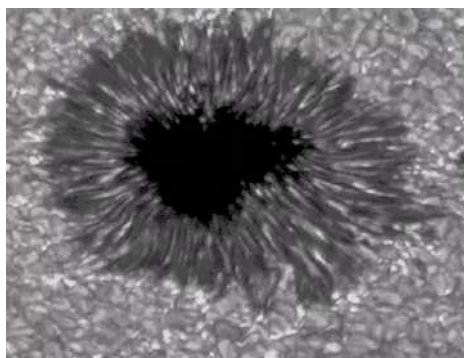


Рис. 24.14. Солнечные пятна

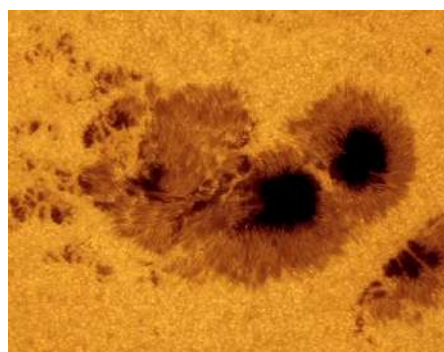


Рис. 24.15. Солнечные пятна

У солнечного пятна центральная область называется *ядром пятна* (тенью).



Рис. 24.16. Солнечные пятна

24.2. Явления солнечной активности. Их влияние на Землю

Явления солнечной активности – это явления, которые меняют внешний вид Солнца: появление солнечных пятен, их преобразование и т.д.

Звезда Солнце – крайне спокойная звезда, однако иногда происходят изменения: Солнце бывает покрыто мощными, крупными, многочисленными Солнечными пятнами (рис. 24.17). Иногда поверхность Солнца почти чистая – без солнечных пятен (рис. 24.18). Активность Солнца меняется с периодом около 11,2 лет.



Рис. 24.17. Наземная фотография Солнца в видимом свете 28 октября 2003 г

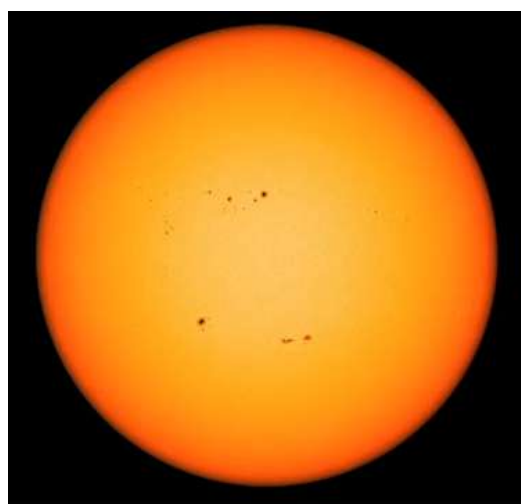


Рис. 24.18. Снимок Солнца из космоса в видимом свет 5 июня 2012

Один из индикаторов активности Солнца – количество пятен на его поверхности. Оно изменяется почти периодически, хотя иногда бывают эпохи почти полного отсутствия пятен.

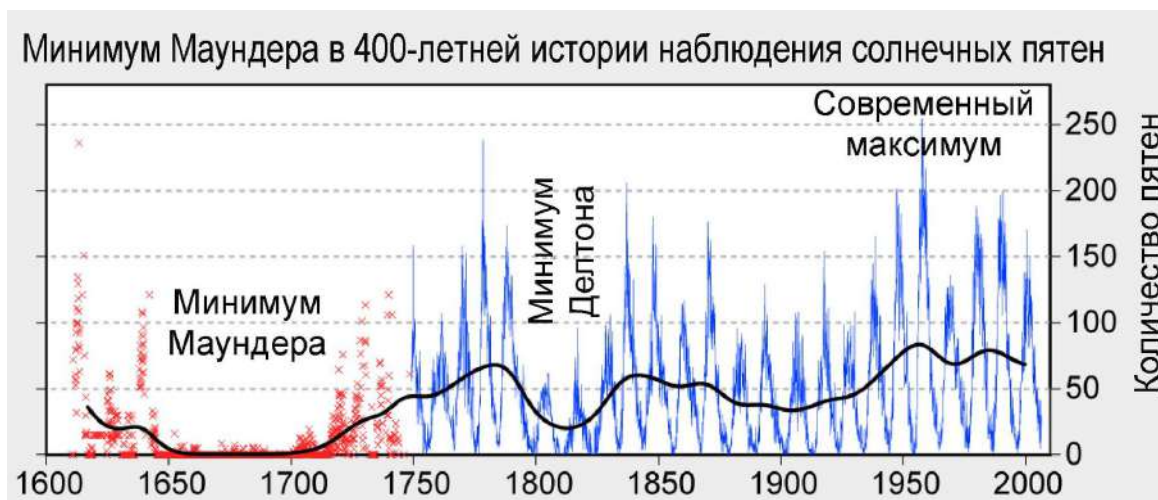


Рис. 24.19. Изменение солнечной активности

В настоящее время Солнце изучается детально. Поверхность Солнца можно фотографировать сквозь специальные светофильтры в определенных спектральных линиях.

На фотографии Солнца в линии излучения водорода (рис. 24.20) хорошо видно, что на фоне более однородной солнечной поверхности есть более горячие области, более холодные.

На фотографии Солнца в линии излучения ионизованного железа (рис. 24.21) или гелия. Каждый такой светофильтр представляет Солнце по-разному.

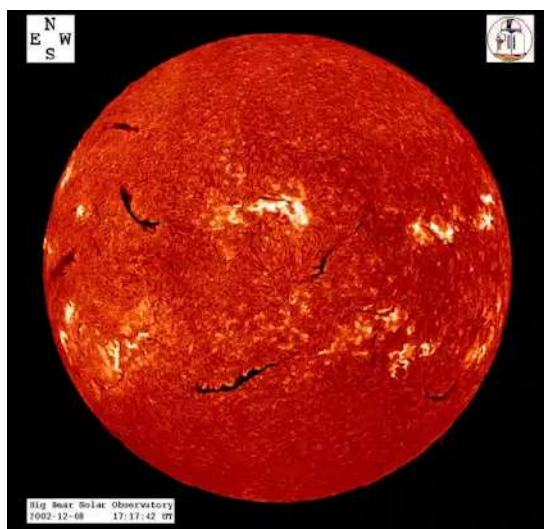


Рис. 24.20. Фотография Солнца в линии излучения водорода

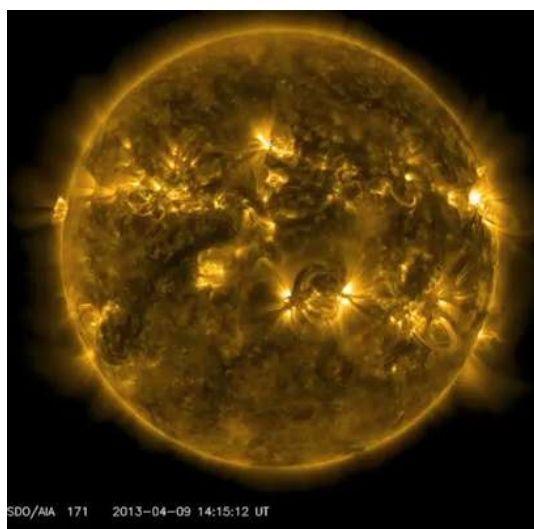


Рис. 24.21. Фотография Солнца в линии излучения ионизованного железа

Магнитное поле на поверхности Солнца

Источником активности на поверхности Солнца служит магнитное поле. Оно передаёт энергию движения внутренних слоёв.

На рисунке 24.22 хорошо видно поведение силовых магнитных линий, описывающих дугу от северного к южному магнитному полюсу, около солнечных пятен.

Солнце – относительно спокойная звезда. Но даже его слабая активность: солнечные вспышки и корональные выбросы, заметно отражается на состоянии межпланетной среды и верхних слоёв земной атмосферы.

От поведения силовых линий магнитного поля зависит поведение разреженного электропроводящего газа. Если силовые линии имеют достаточное напряжение, чтобы выбросить газ с поверхности Солнца, то это происходит в виде выброса *протуберанцев*.

Газ постепенно испаряется из любой точки солнечной поверхности – происходит медленный отток солнечной плазмы во всех направлениях – спокойный *солнечный ветер*.



*Рис. 24.22. Поведение магнитного поля
на Солнце*

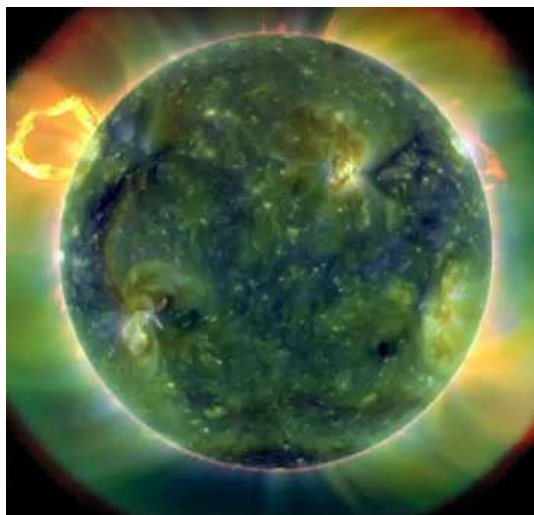


Рис. 24.23. Выброс протуберанцев

На серии фотографий (рис. 24.24, 24.25) хорошо показан выброс активного протуберанца.



Рис. 24.24. Активный протуберанец



Рис. 24.25. Активный протуберанец

В моменты солнечных затмений процесс выброса газов виден четко: видны как однородные потоки плазмы и более мощные потоки.



*Рис. 24.26. Выброс протуберанца в
момент солнечного затмения*



*Рис. 24.27. Выброс протуберанца в
момент солнечного затмения*

В фотосфере Солнца постоянно происходят "нановспышки" с относительно небольшим выделением энергии, около 240 Мт ТНТ. Они существенно подогревают солнечную корону.

Магнитное поле Земли частично защищает нашу планету от потоков солнечного ветра. Но быстрые протоны и электроны накапливаются в радиационных поясах Земли, представляя опасность для космонавтов.

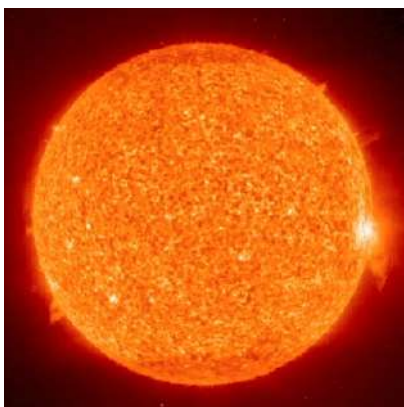


Рис. 24.28. Нановспышки в фотосфере Солнца



Рис. 24.29. Магнитное поле Земли

Иногда в атмосферу Земли влетают мощные потоки радиации и поглощаются на высотах от 50 до 500 км от поверхности Земли. Во время поглощения возбуждаются атомы нашей атмосферы, и они светятся в виде явлений полярного сияния (рис. 24.30).

Литература

Рекомендации:

- Небесные магниты. Автор: Соколов Д.;
- Дракон, пожирающий Солнце. Автор: Масликов С.Ю.



Рис. 24.30. Северное сияние



Рис. 24.31. Рекомендуемая литература

Урок 25. Звезды: формирование и эволюция



Рис. 25.1. Формирование и эволюция звезд

25.1. Формирование и основные этапы эволюции звезд

В межзвездном пространстве есть разреженное звездное вещество – это газ в разных его формах:

- холодный – молекулярный;
- теплый – атомарный;
- горячий – корональный.

Все формы газа так или иначе связаны с эволюцией звезд.



Рис. 25.2. Межзвездное пространство и вещество



Рис. 25.3. Межзвездное пространство и вещество

Из холодного газа – звезды формируются, горячий газ обычно выбрасывается в виде солнечного ветра. Формирование звезд происходит в тех областях межзвездной среды, где давление газа низкое и гравитация способна сжимать газ в более плотные объекты. Низкое давление там, где маленькая температура.

Если на фоне звёзд виден тёмный провал, то это не «дыра» в небе, а преграда для света – облако холодного газа и пыли, место рождения новых звёзд и планет.

Четыре основных этапа формирования звезды были описаны в уроке 22 (стр. 246):

- 1 этап. Протозвездное облако.
- 2 этап. Аккреция на протозвезду.
- 3 этап. Протопланетный диск.
- 4 этап. Планетная система.



Рис. 25.4. Четыре основных этапа формирования звезды.

Своей высокой температурой поверхности, потоками газа (в виде звездного ветра) звезда нагревает окружающее пространство. Тот газ, который не вошел в состав молодых звезд, нагревается ими до высокой температуры и начинает светиться. Пример: туманность Ориона (рис. 25.5) – в этой области формируются сотни новых звезд.

На продвинутом этапе молодые звезды нагрели газ так, что он повысив температуру начал расширяться горячим пузырем, расталкивая и уплотняя на своих стенках окружающее вещество.



Рис. 25.5. Туманность Ориона



Рис. 25.6. Продвинутый этап в области звездообразования



Рис. 25.7. Звездное скопление 30 Doradus (Тарантул) в галактике Большое Магелланово Облако. Фото: «Хаббл»



Рис. 25.8. Звёздное скопление NGC 3532. Фото: 2,2-метровый телескоп Южной Европейской обсерватории, Ла-Силья, Чили

Перенос энергии от недр к поверхности

Звезды могут быть подобны Солнцу – такие звезды относят к промежуточному типу массы: они не очень большие, не очень маленькие. Звезды могут быть мало массивными – с массой в 3-4 раза меньше солнечной массы, а могут быть более массивными – в несколько раз превышающие массу Солнца.

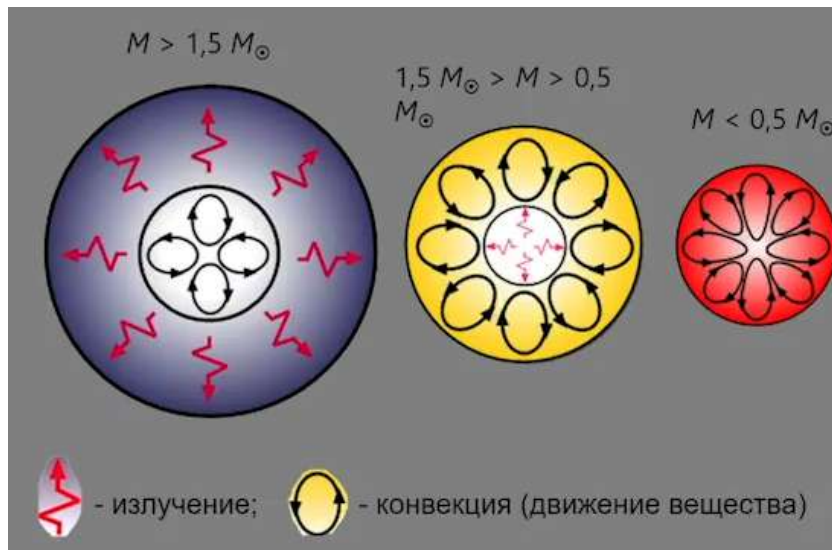


Рис. 25.9. Перенос энергии из недр к поверхности

В недрах звезд разных масс по-разному происходит передача энергии от ядра (центральной части, где протекают термоядерные реакции) к поверхности звезды, откуда тепло покидает звезду в виде света или потоков звездного ветра покидает звезду.

Энергия передается разными путями:

- теплопроводность;
- конвективная передача тепла – передача тепла вместе с веществом;
- передача тепла путем излучения.

В недрах звезд теплопроводность малоэффективный метод, который практически не работает.

В недрах Солнца в ядре в основном работает лучевой механизм.

В более массивных звездах: в ядре звезды в основном работает конвекция, а на периферии работает лучевой перенос.

Эволюция Солнца

В настоящее время Солнце находится в середине жизненного цикла (рис. 25.10). Постепенно свойства Солнца изменяются: как внутреннее строение, так и внешний вид.

Внутри, там, где происходят термоядерные реакции, водород превращается в гелий, а при температурах характерных для солнечных недр гелий не может превращаться в более сложные элементы. Поэтому гелий остается как вещество, не способное выделять тепло. Так, гелий постепенно в ядре звезды накапливается, сжимается под воздействием гравитации. На его поверхности водород начинает активнее и активнее принимать участие в термоядерных реакциях. Солнце начинает становиться все более мощным источником тепла.

За каждый миллиард лет примерно на 10% возрастает мощность Солнца. Со временем Солнце станет еще более мощным, чем сейчас, расширится, сбросит оболочку и его ядро превратится в белый карлик.



Рис. 25.10. Эволюция солнца

Оптические спектры звезд

Внешне звезды изучают, анализируя цветовой состав их излучения (спектр). Горячие массивные звезды имеют спектр, в котором в основном присутствуют линии гелия.

Астрономы выделяют звезды не по температуре поверхности звезды, а по *спектральным классам*.

Спектральный класс – это классификация звезд по внешнему виду спектра (рис. 25.11). Спектральные классы обозначаются буквами: *O, B, A, F, G, K, M*.

Солнце имеет спектральный класс *G*. Другие звезды имеют в своем спектре более выраженные линии водорода (особенно звезды класса *A*). Это характеризует температуру поверхности звезды.

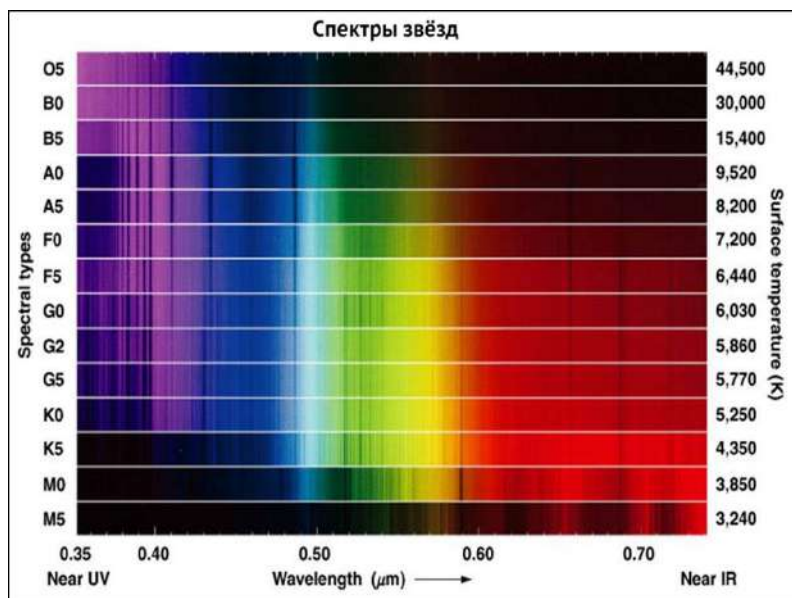


Рис. 25.11. Оптические спектры звезд

В начале 20 века астрономы, изучая звезды, начали наносить их положение на диаграмму, где по горизонтальной оси отложен спектральный класс (температура): от самых горячих до умеренно горячих; по вертикальной оси – мощность излучения (светимость).

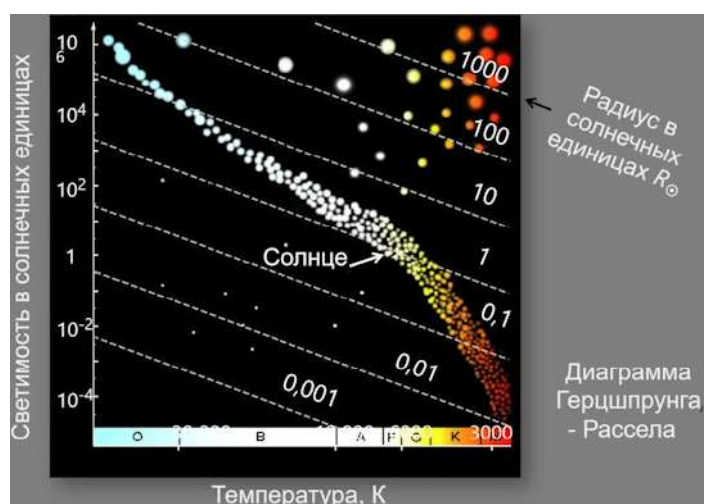


Рис. 25.12. Диаграмма «Светимость-температура»

Все изученные звезды почти целиком легли на широкую диагональную полосу: от холодных, слабо светящихся до горячих мощных излучающих звезд. Эту полосу называют *главной последовательностью* на диаграмме «температура-светимость». По традиции эта диаграмма называется *диаграммой Герцшпрунга-Рассела*.

Существует более примитивная форма диаграммы Герцшпрунга-Рассела (рис. 25.13). *Теория физического строения звезд* говорит о том, что на этой линии находятся звезды на основном этапе своей жизни: когда в их недрах в результате термоядерных реакций водород превращается в гелий.

На определенных этапах жизни положение звезд перемещается внутри диаграммы. На диаграмме (рис. 25.14) линией показан *эволюционный трек*:

- звезда образуется, начинаются термоядерные реакции; тогда звезда занимает место в последовательности Герцшпрунга-Рассела в соответствии со своей массой;
- когда водород сгорает в ядре, гелиевое ядро начинает сжиматься: под действием вышележащих слоев сжимается сильнее и сильнее, водород начинает гореть активнее, оболочка звезды расширяется, и звезда становится большим и мощным объектом, но с пониженной температурой – тогда она смещается в область *красных гигантов*;
- оболочка звезды сбрасывается, ядро остывает, теряет мощность излучения и переходит в область белых карликов.

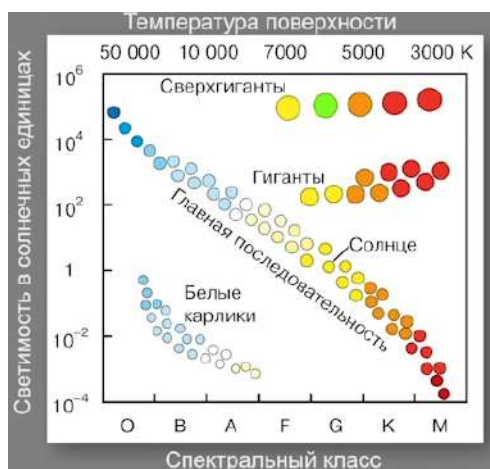


Рис. 25.13. Диаграмма «Светимость-температура»

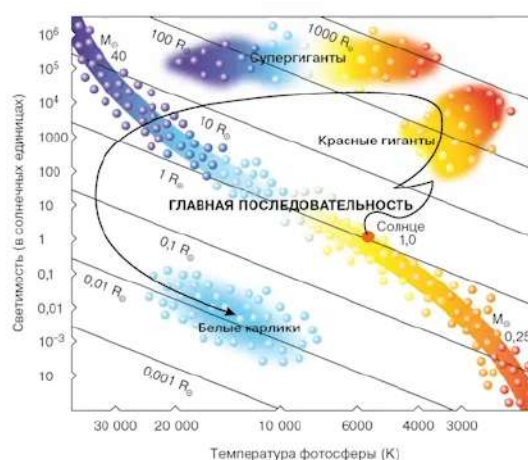


Рис. 25.14. Эволюция Солнца на диаграмме T-L

25. 2. Поздние стадии эволюции звезд. Планетарные туманности

Рассмотрим более детально и физично вопрос о расширении звезды.

У звезд большой массы запасов светимости, как у нашего Солнца, нет. Когда масса звезды велика, она излучает настолько мощно, что исходящие из недр кванты излучения начинают создавать давление, превосходящее газовое давление. Т.е. звезда

противостоит гравитационному сжатию не за счет газового, а за счет светового давления. Поэтому переходя в область гигантов, звезда меняет температуру своей поверхности, но практически не меняет мощность излучения.

На графике (рис. 25.17) показано, что звезды, подобные Солнцу, могут увеличить мощность излучения, звезды умеренной массы не сильно увеличивают излучения, а звезды большой массы практически не увеличивают.

Интересно, что время жизни звезды и яркость (мощность) излучения зависят от количества сложных химических элементов, которые находятся в веществе звезды. Почти все вещество звезды – это водород и гелий, и около 1% – это содержание других элементов. Эти небольшие доли процента практически руководят жизнью звезды.

Тяжелые элементы обеспечивают непрозрачность вещества звезды и поглощают свет, выходящий из звездных недр. Поэтому если тяжелых веществ много (2% - предельное число) – энергия в виде квантов с трудом проходит к поверхности сквозь тяжелые элементы, звезда не так быстро теряет запасы энергии. Поэтому светимость ее не велика, а время свечения (время, за которое водород превращается в гелий) довольно большое – более 10 млрд лет.

Звезды, лишённые тяжелых элементов, легко выпускают излучение из своих недр, что обеспечивает высокую светимость звезде. Но этот процесс довольно быстро истощает запасы ее энергии и поэтому ее возраст не превышает 5.5 млрд лет.

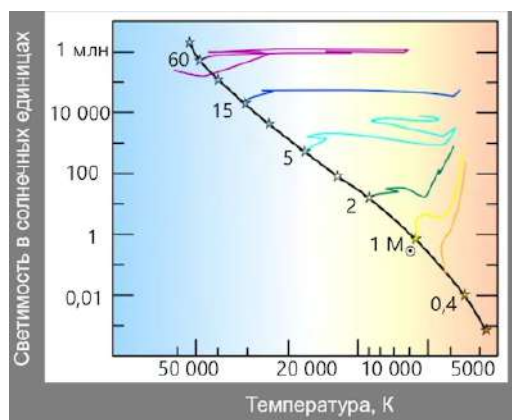


Рис. 25.17. Эволюция звёзд разной массы

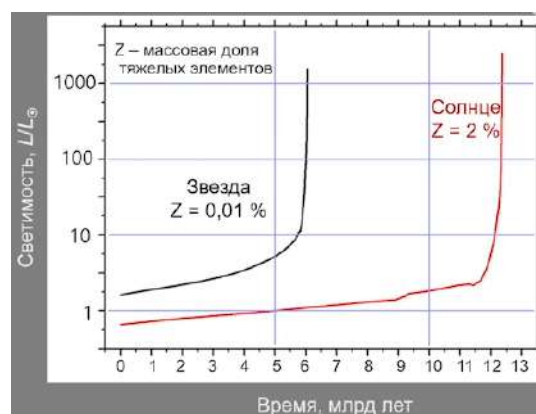


Рис. 25.18. Эволюция светимости звезды с массой $1 M_{\odot}$

Красные гиганты

На изображениях (рис. 25.19, 25.20) показана математическая модель красного гиганта. Его конвективные потоки имеют большой размер, так как атмосфера протяженная, разжиженная, низкоплотная. Такая математическая модель довольно точно соответствует тому, что астрономы видят, изучая красные гиганты, такие как Бетельгейзе (рис. 25.22) – однако, его изображение не такое детальное, как математическая модель.

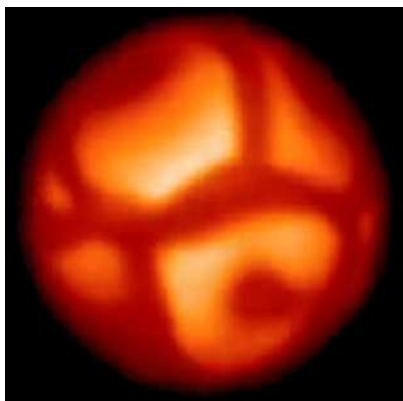


Рис. 25.19. Численная
гидродинамическая модель: Bernd
Freytag, Uppsala university

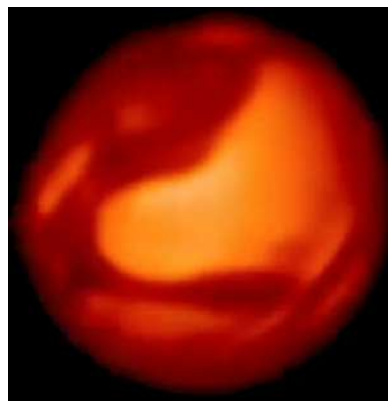


Рис. 25.20. Численная
гидродинамическая модель: Bernd
Freytag, Uppsala university

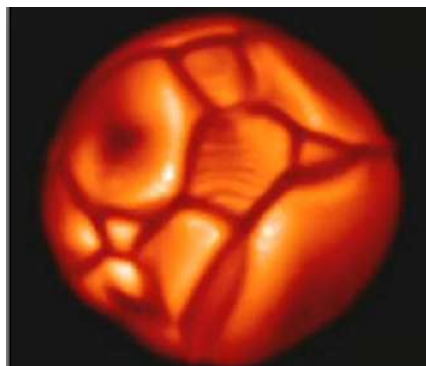


Рис. 25.21. Супергрануляция на
поверхности красного сверхгиганта.
Численная гидродинамическая модель:
Bernd Freytag, Uppsala University

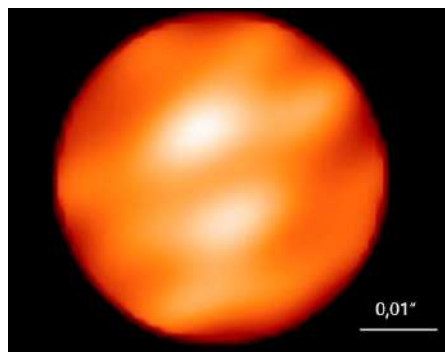
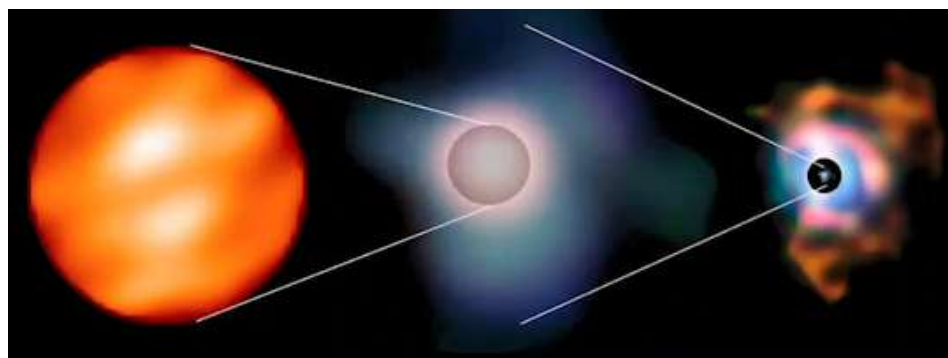


Рис. 25.22. Изображение Бетельгейзе

С использованием инфракрасных телескопов астрономы заметили, что кроме плотного тела звезды, оно окружено большим количеством газа. Радиотелескопы показывают еще более обширную оболочку (рис. 25.23).

Планетарные туманности

Газ формирует огромное газовое облако, вокруг остатка звезды, которые называются *планетарные туманности* (рис. 25.24). Планетарными они называются в силу того, что они напоминают диск планеты. Но планетарные туманности не всегда бывают симметричные – иногда они имеют довольно необычную и сложную форму (рис. 25.25).



10 а.е.

50 а.е.

1000 а.е.

Фотосфера
(поверхность) звезды

Потоки звездного ветра

Пылевой кокон звезды

Рис. 25.23. Красный сверхгигант - Бетельгейзе



Рис. 25.24. Планетарные
туманности

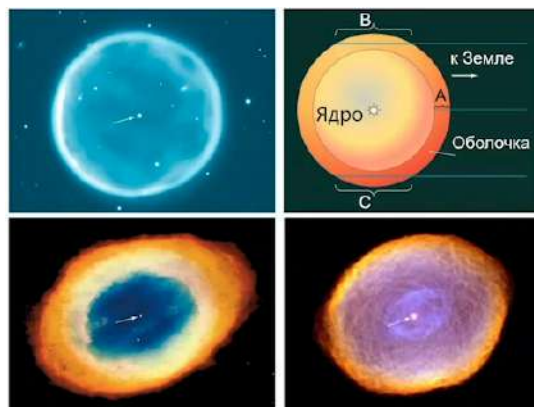


Рис. 25.25. Необычная форма
планетарных туманностей

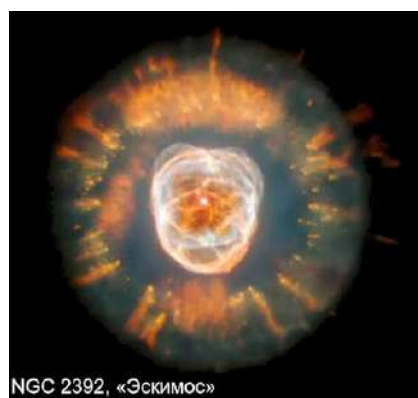


Рис. 25.26. Планетарные туманности



Рис. 25.27. Сложная форма
планетарной туманности

Урок 26. Релятивистские звезды и гравитационные волны

Релятивистская физическая теория означает общая теория относительности Эйнштейна, т.е. современная физика. Однако не все небесные объекты нужно описывать в рамках самой современной физики. Иногда достаточно бывает, например, теории Ньютона: движение звезд друг относительно друга, их притяжение адекватно можно описать ньютоновской физикой и не нужны сложные формулы ОТН.

Однако без теории относительности не обойтись. В этом смысле остатки звездной эволюции называются *релятивистскими*.

Звезда – небесное тело, в недрах которого происходят термоядерные реакции. В остатках звезд термоядерные реакции не происходят. Однако, по традиции, астрономы такие тела (остатки звезд) называют звездами.

Гравитационные волны могут дать много информации о взаимодействии черных дыр и об их природе.

26.1. Белые карлики и нейтронные звезды

Белые карлики и нейтронные звезды – это остатки эволюции звезд разной массы. И белые карлики, и нейтронные звезды очень маленькие. Когда они летают сами по себе в космосе – обнаружить их очень трудно.

Нередко бывают ситуации, когда рядом с нормальной звездой оказывается маленький плотный релятивистский объект – остаток эволюции. На этот остаток, притягиваясь, падает вещество с нормальной звезды. Падающее вещество нагревается, сжимается, начинает ярко излучать и рентгеновские, и ультрафиолетовые, и гамма-лучи. Остатки газа, которые не упали на белый карлик с огромной скоростью вырываются из аккреционного диска в виде двух потоков газа – *джетов*.

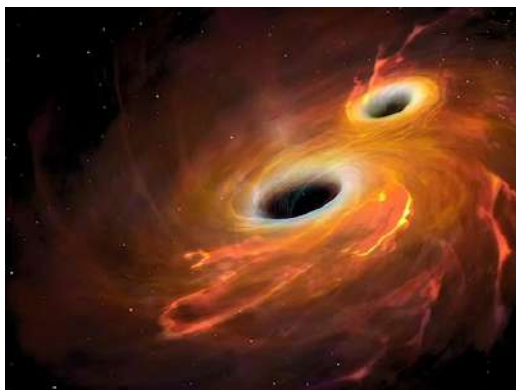


Рис. 26.1. Взаимодействие дыр.
Представление художника

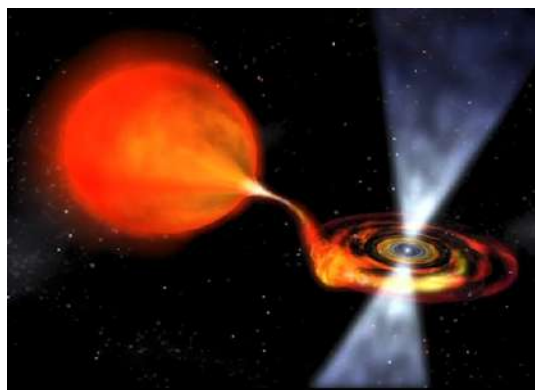


Рис. 26.2. Выброс потоков газа
(джетов)

Звезды рождаются в результате гравитационного сжатия гигантских молекулярных облаков. В начале звезды имеют разную массу: от $1/10$ массы Солнца до сотен масс Солнца. На уровне $10M_{\odot}$ проходит граница между мало массивными и очень массивными звездами.

В конце легкие звезды заканчивают свою эволюцию: в ядре заканчивается топливо, оно начинает сжиматься и нагреваться – звезда расширяется и превращается в *гиганта*. Охлажденная поверхность гиганта приобретает красновато-оранжевый цвет. Позже оболочка сбрасывается и на месте бывшей звезды остается ее ядро, лишенное термоядерных источников энергии – *белый карлик*.

Если звезда более массивная: с массой от $10M_{\odot}$ и более, в конце своей эволюции расширяется еще сильнее и превращается в *красный сверхгигант*, далее происходит взрыв, который называется *взрыв сверхновой звезды*. На этом месте остается маленькое плотное ядро, которое может принять форму *нейтронной звезды* или *черной дыры*.



Рис. 26.3. Конечные этапы эволюции звёзд

Белые карлики

История открытия первого белого карлика была описана в предыдущих уроках: когда астрономы наблюдали за звездой Сириус, они заметили его волнообразное движение по нему (рис. 26.5). Тогда ученые поняли, что рядом с Сириусом скорее всего есть спутник, вместе с которым Сириус обращается вокруг общего центра масс.



Рис. 26.4. Фотография
белого карлика,
полученная телескопом
«Хаббл»



Рис. 26.5. Траектория движения Сириуса А и Сириуса В
до последних лет

К настоящему моменту в космическом пространстве найдены десятки тысяч белых карликов. Они существуют и единично, и в составе двойных звездных систем. Как правило, они имеют размер, как у нашей планеты, а массу как у Солнца. Следовательно, средняя плотность в миллион раз ($100 \times 100 \times 100$) больше, чем у Солнца, т. е. $1,5 \text{ млн г/см}^3$.

Астрономам интересно изучать белые карлики, так как непонятно, какое тяготение на их поверхности, т.к. они с огромной силой пытаются сжать себя.

Теорию белых карликов в 1930-е годы создал американский астрофизик Субраманьян Чандрасекар (нобелевский лауреат). В эти годы возникла новая наука – квантовая механика. Используя ее, С. Чандрасекар смог описать условия, которые существуют в недрах карликов. В этом ему помог т.н. *принцип запрета Паули*.



Рис. 26.6. Размеры белого карлика



Рис. 26.7. Субраманьян Чандрасекар (1910-1995)

Принцип запрета Паули

Квантовая механика утверждает, что две элементарные частицы (фермионы) с одинаковыми свойствами не могут располагаться рядом.

При большой плотности вещества электроны испытывают сильное взаимное отталкивание, не позволяющее веществу сжиматься ещё сильнее. Физики называют это «давлением вырожденного электронного газа».

Именно этот эффект противодействует гравитационному сжатию белых карликов (и нейтронных звёзд, о чём речь пойдёт впереди).

Белые карлики в одиночестве плохо себя проявляют, но в составе двойных систем белые карлики могут проявлять себя очень ярко. На изображении (рис. 26.9) показана известная звезда *Мира* в созвездии Кит.



Рис. 26.8. Вольфганг Паули (1900 – 1958)

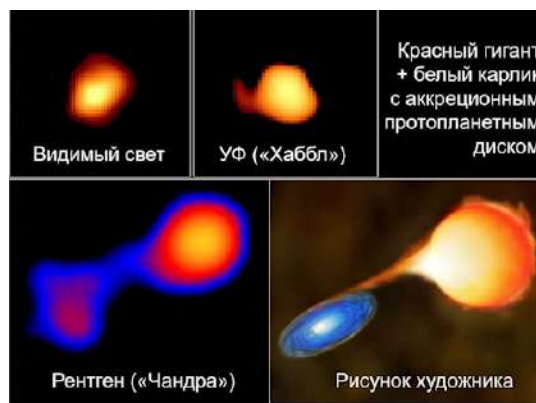


Рис. 26.9. Мира Кита – двойная с белым карликом

Белый карлик состоит из пепла термоядерных реакции. т.е. вещество, из которого он состоит, не может гореть или участвовать в термоядерном синтезе. Однако в двойной системе с нормальной звезды на белый карлик падает вещество и накапливается на его поверхности. По достижению критической массы водорода и гелия, начинается реакция термоядерного синтеза. Особенность вещества на поверхности белого карлика состоит в том, что рост температуры газа не приводит к росту давления в нем и вещество не сбрасывается. Поэтому температура растет, термоядерные реакции происходят все более активно, а вещество по-прежнему лежит на поверхности белого карлика, пока не сгорит – происходит термоядерный взрыв. Такой взрыв астрономы называют *взрыв новой*.

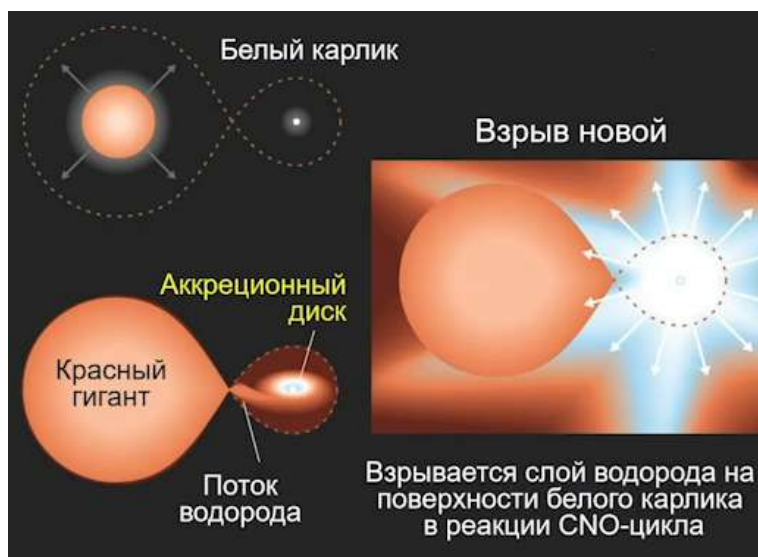


Рис. 26.10. Взрыв новой звезды

В 1901 году на небе Земли появилась новая яркая звезда – Персея.

В 1054 г наблюдался взрыв сверхновой в созвездии Телец. Ныне Крабовидная туманность имеет диаметр 11 св. лет и расширяется со скоростью 1500 км/с. В её центре (кружок) находится нейтронная звезда.



Рис. 26.11. Новая Персея 1901 г. Снимок 2011 г.



Рис. 26.12. Взрыв сверхновой в созвездии Телец

Нейтронные звезды

Белые карлики имеют размеры подобные размерам Земли, а нейтронная звезда при массе немного большей, чем у белого карлика, имеет радиус около 10 км. Ее плотность $\rho=10^{15}$ г/см³, а магнитное поле $B=10^{11}$ Тл= 10^{15} Гс.

Нейтронные звезды проявляют себя как небольшие быстро-вспыхивающие маяки, т.к. при сжатии нейтронная звезда увеличивает скорость своего вращения (рис. 26.14) по закону сохранения момента импульса. В тех местах, где магнитное поле генерирует электромагнитное излучение, они работают как лучи света (рентгеновских или радио лучей). Такие объекты называют *пульсарами*.

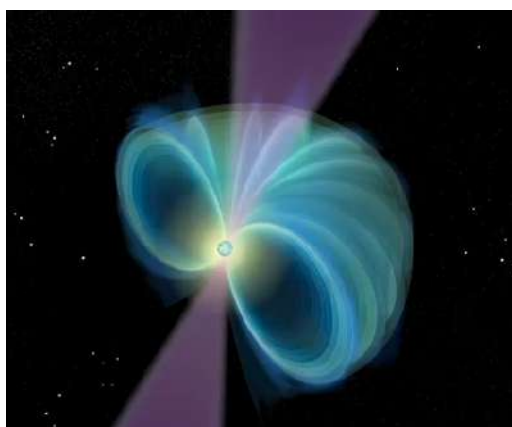


Рис. 26.13. Нейтронная звезда

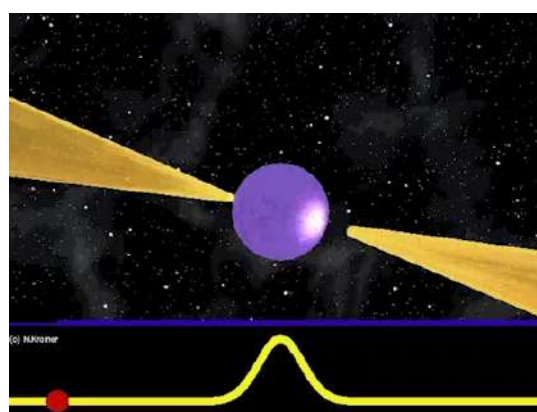


Рис. 26.14. Нейтронная звезда – пульсар

Отклонение света (за счет эффектов общей теории относительности) в гравитационном поле нейтронной звезды позволяет одновременно увидеть оба её полюса и часть обратной стороны.

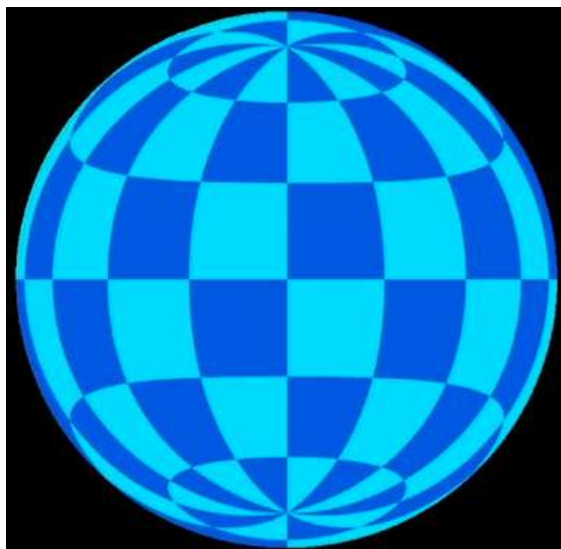


Рис. 26.15. Сетка географических координат на поверхности нейтронной звезды

Черные дыры

В рамках общей теории относительности оказалось, что трудно найти решение тензорных уравнений. Первому это удалось сделать Карлу Шварцшильду.

Горизонт событий чёрной дыры делит пространство-время на две области. Из внешней во внутреннюю попасть можно. А обратно – нет. Свойства сингулярности нам неизвестны.



Рис. 26.16. Карл Шварцшильд (1873 – 1916)

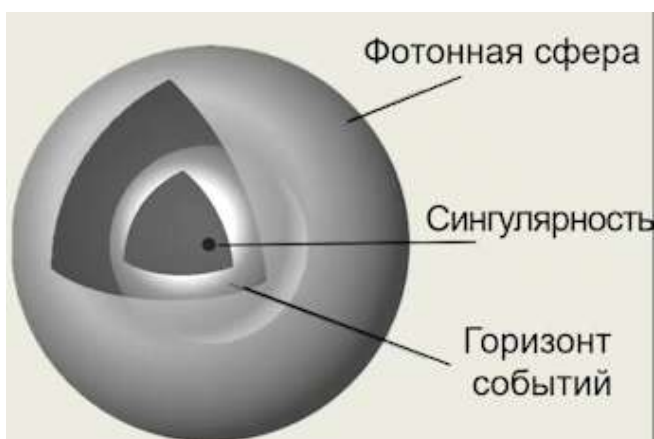


Рис. 26.17. Структура черной дыры

Зависимость времени движения космического корабля к черной дыре от расстояния до ее центра с точки зрения земного наблюдателя (1) и движущегося космонавта. С точки зрения земного наблюдателя космический корабль никогда не проникнет внутрь черной дыры. С точки зрения космонавта он проникает внутрь черной дыры за конечное время (пунктирное изображение корабля).

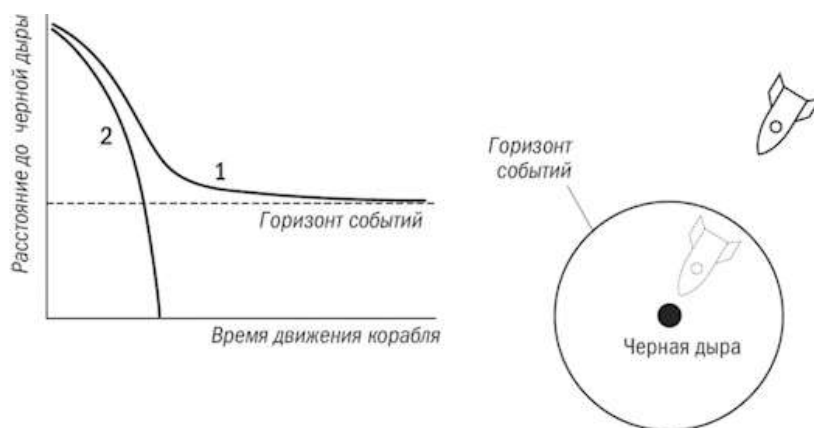


Рис. 26.18. Устройство чёрной дыры

Недавно астрономам удалось увидеть действие черной дыры: в одной из соседних галактик в созвездии Дева. Ученые заметили мощные потоки газа, вылетающие из центра этой галактики. Так появилось подозрение о присутствии черной дыры.

Рождение джета (газового потока) можно объяснить наличием массивной черной дыры (рис. 26.20).



Рис. 26.19. Гигантская эллиптическая галактика Мессье 87

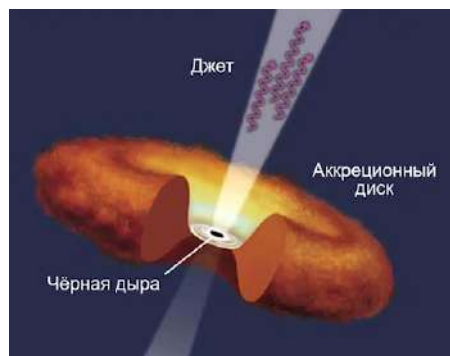


Рис. 26.20. Светящееся вещество вокруг черной дыры

Радиоастрономы объединяют телескопы по всему миру в единую систему (рис. 26.21).

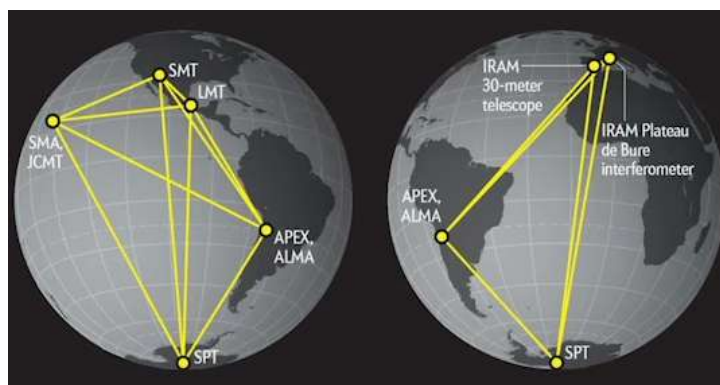


Рис. 26.21. Наблюдение черной дыры в галактике M87

С помощью такой глобальной сети радиотелескопов миллиметрового диапазона ЕНТ (Event Horizon Telescope) в 2019 г. получено изображение сверхмассивной чёрной дыры ($M = 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$) в ядре гигантской эллиптической галактики Мессье 87. На фотографии видны падающее на черное вещество и тень, оставленную черной дырой.

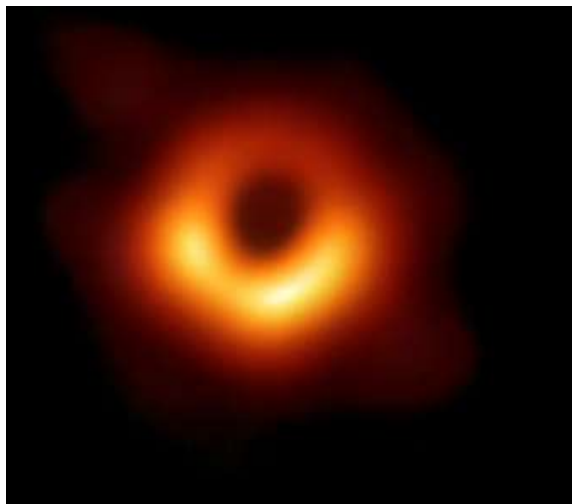


Рис. 26.22. Тень черной дыры в галактике М87

26.3. Гравитационно-волновая астрономия

Черные дыры – это чистая гравитация, значит и проявляют они себя только гравитационным образом.

Теория Эйнштейна в начале 20 века предсказывала, что если массивные тела движутся ускоренно, то они должны менять геометрические свойства пространства и времени (должны излучать гравитационные волны).



Рис. 26.23. Изменение гравитационного пространства

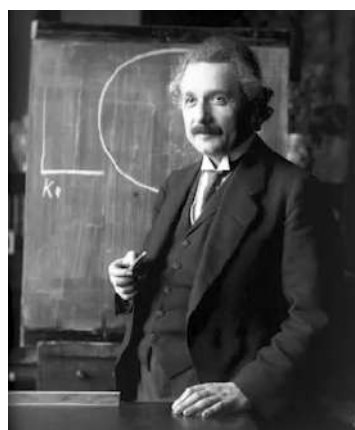


Рис. 26.24. А. Эйнштейн

Гравитация – очень слабая сила.

$$\frac{\text{Электричество}}{\text{Гравитация}} \rightarrow \frac{F_{\text{эл}}}{F_{\text{гр}}} \approx 10^{36}$$

Генерация гравитационной волны

В лаборатории создать гравитационную волну нельзя. Только массивные и быстро движущиеся объекты могут создать заметную гравитационную волну.

Поле ускорений, вызванных гравитационной волной подобно полю приливных ускорений (рис. 26.26)

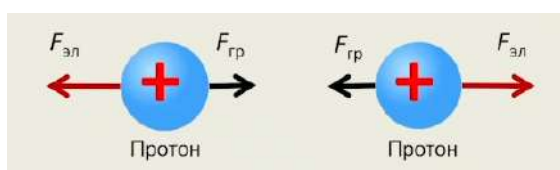


Рис. 26.25. Гравитационная энергия

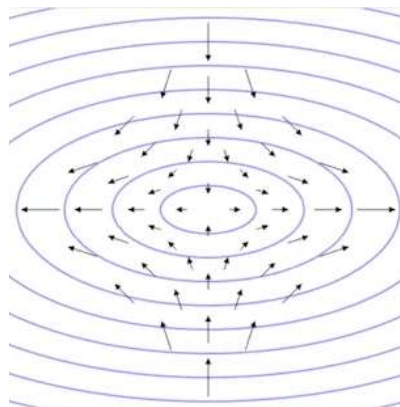


Рис. 26.26. Действие гравитационной волны

Если поместить тело на пути волны, то тело начнет деформироваться – возникнет напряжение. Ученые выполнили моделирование такой деформации (рис. 26.27, 26.28).

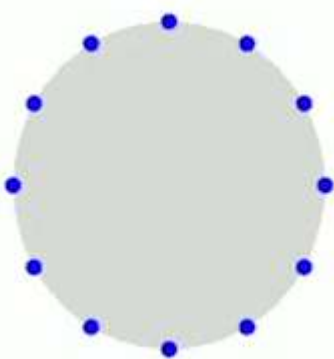


Рис. 26.27. Деформация упругого тела под действием гравитационной волны

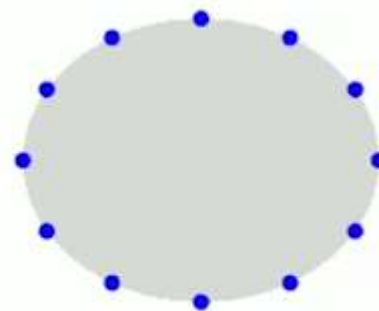


Рис. 26.28. Деформация упругого тела под действием гравитационной волны

Первую попытку зафиксировать гравитационные волны предпринял Джозеф Вебер (рис. 26.29). Д. Вебер создал крупные многотонные алюминиевые цилиндры, установил на них специальные датчики, фиксирующие колебания. Таким образом, он

попытался зафиксировать гравитационные волны, приходящие из космоса. Однако, сделать это ему не удалось.



Рис. 26.29. Джозеф Вебер (1919-2000) и его первый детектор гравитационных волн

Более успешным оказался эксперимент другого характера (рис. 26.30): гравитационная антенна со свободно подвешенными зеркалами. Система работает таким образом, что луч лазера бегает между одной парой зеркал и другой парой, которые расположены взаимно перпендикулярно. Если приходит гравитационная волна, зеркала начинают двигаться в противофазе: пути светового луча меняются и, возвращаясь и складываясь вместе, демонстрируют интерференционную картину, которая меняется в темпе колебания зеркала.

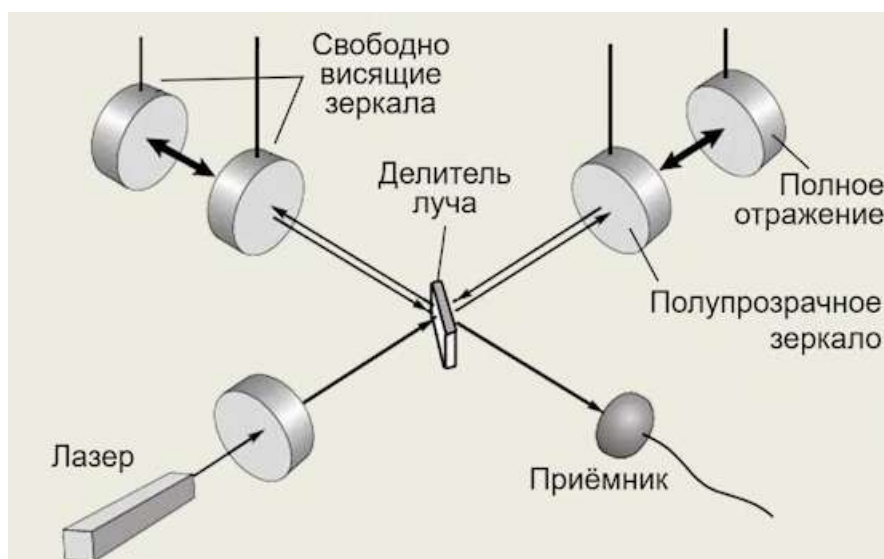


Рис. 26.30. Интерферометр со свободно подвешенными зеркалами

Установка гравитационно-волновых детекторов имеет грандиозные масштабы (рис. 26.31, 26.32).



Рис. 26.31. Гравитационно-волновой детектор LIGO



Рис. 26.32. Гравитационно-волновой детектор LIGO

Европейский детектор гравитационных волн VIRGO расположен в Италии. Длина каждого плеча 3 км.

Европейский детектор гравитационных волн GEO600 расположен в Германии. Длина каждого плеча 600 м.

Детекторы долго создавали и доводили до высокого качества, чтобы они не фиксировали разные случайные колебания (колебания почвы земли, звуки).



Рис. 26.33. Гравитационно-волновой детектор VIRGO



Рис. 26.34. Гравитационно-волновой детектор GEO600

В сентября 2015 года от двух антенн, находящихся в 3 000 км, друг от друга пришли одинаковые сигналы (рис. 26.35). В начале 2016 года об этом было объявлено официально.

Позже было выяснено, что источником этой гравитационной волны было слияние массивных черных дыр. Они обращались вокруг общего центра масс. Во время слияния гравитационная волна достигла максимальной амплитуды.

17 августа 2017 г. впервые был замечен гравитационный импульс от слияния двух нейтронных звёзд (рис. 26.37). Это событие наблюдалось и в широком электромагнитном диапазоне.

В момент слияния черных дыр наблюдается только гравитация, а в момент слияния нейтронных звезд еще видна вспышка.

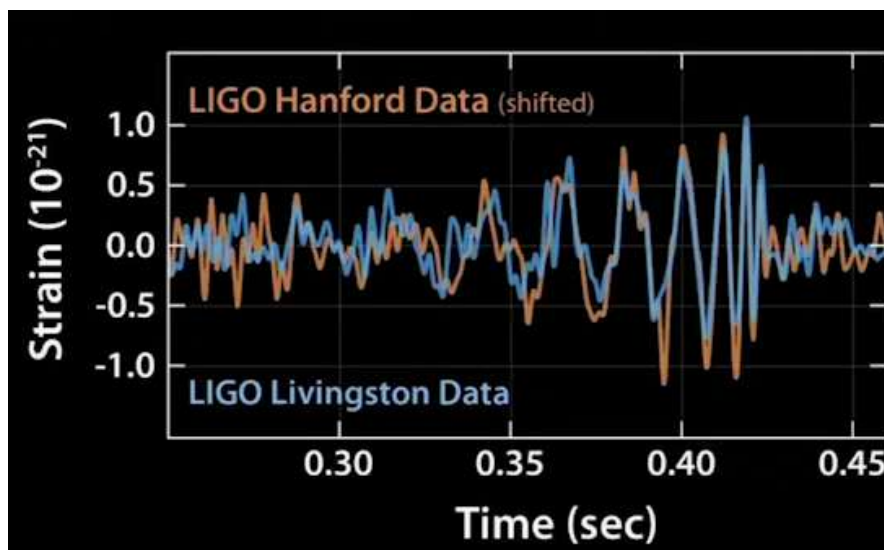


Рис. 26.35. Первое обнаружение гравитационной волны

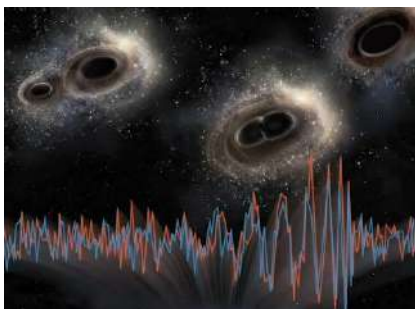


Рис. 26.36. Гравитационный импульс от слияния черных дыр



Рис. 26.37. Моделирование. Слияние нейтронных звезд

Литература.

Рекомендации:

- Книга о черных дырах. Авторы: С. Габсер, Ф. Преториус.



Рис. 26.38. Маленькая книга о черных дырах. Авторы: С. Габсер, Ф. Преториус

Урок 27. Наша звёздная система – Галактика

Древние греки назвали Млечный путь, который пересекает небо – $\gamma\alpha\lambda\alpha\zeta\iota\alpha\varsigma$ («галактикос»). Отсюда сложилось название нашей звездной системы – Галактика. Это название всегда пишется с большой буквы. На английском языке говорят *Milky Way* – Галактика Млечный Путь, а в русском языке обычно употребляют только слово «Галактика». Другие звездные системы также называют галактиками, но пишут с маленькой буквы.

27.1. Звездное окружение Солнца. Элементы динамики звездных систем

Звезды, окружающие Солнце постоянно перемещаются. Так, например, 100 000 лет назад «Ковш» Большой медведицы выглядел иначе, чем мы знаем его сегодня (рис. 27.1, 27.2).

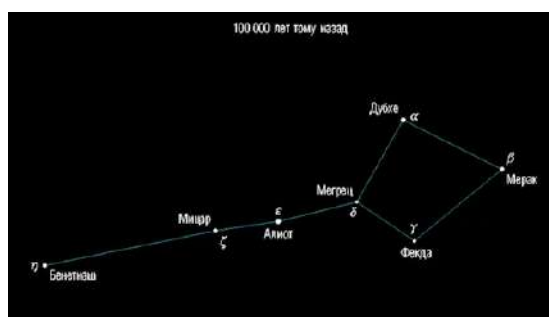


Рис. 27.1. Перемещение звезд. Астеризм «Ковш» Большой медведицы 100 000 лет назад

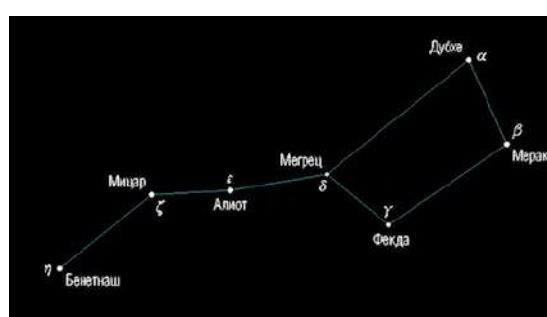


Рис. 27.2. Перемещение звезд. Астеризм «Ковш» Большой медведицы в настоящее время

Взаимная гравитация звезд не позволяет им удаляться далеко друг от друга и удерживает их в одном месте. Такое место и называется *галактикой*.

Галактика – это гигантская звездная система, что до первых десятилетий прошлого века астрономы считались, что Галактика – единственное население нашей Вселенной: Солнце и окружающие звезды, составляющие звездную систему. Это оказалось не так. Существует множество других галактик. Каждая из них представляет собой колоссальное семейство звезд, родившихся в разные эпохи, но взаимодействующих друг с другом.

В нашей Галактике примерно 200 млрд звезд. Если подумать, что на Земле живет менее 10 млрд человек, тогда получается, что на каждого человека приходится примерно по 20 звезд в нашей Галактике. А ведь почти у каждой звезды есть планетная система. Поэтому не исключено, что в нашей Галактике существуют и другие разумные существа.

В настоящее время хорошо изучено только ближнее окружение Солнца (рис. 27.3). На изображении Солнце находится в центре, однако его можно перенести к любой другой звезде.

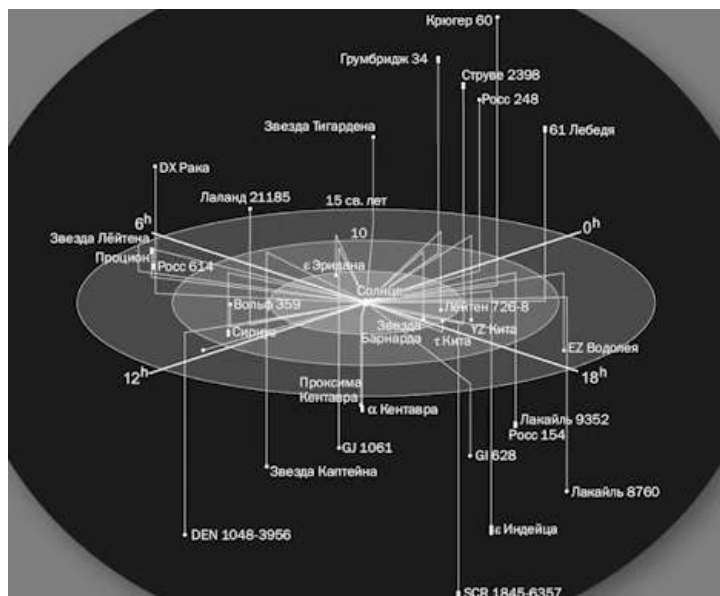


Рис. 27.3. Ближайшие звезды

Изображение (рис. 27.4) показывает, какой объем в световых годах занимают ближайшие к Солнцу звезды. Наше Солнце имеет средний размер относительно остальных звезд: есть много более маленьких, и много более больших звезд. Звезды крупнее Солнца – например, *Сириус* или *Процион*.

Астрономы хорошо изучили движение звезд, вычислили моменты, когда та или иная звезда сблизится с Солнечной системы и т.д. В ближайшие 100 млн лет не будет тесного сближения с соседними звездами.

Межзвездные путешествия пока невозможны из-за огромных расстояний. До ближайшей звезды *Proxima* примерно 4 световых года. Преодолеть такое расстояние на современных ракетах – невозможно.

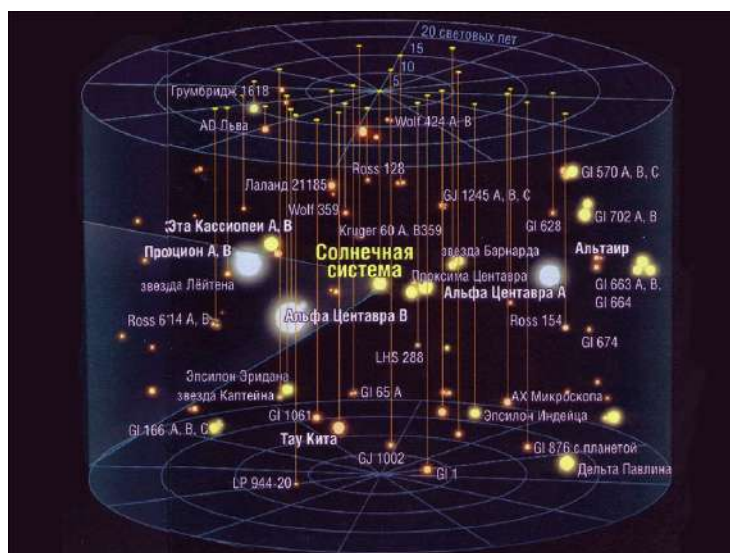


Рис. 27.4. Ближайшие звезды

Звезды рождаются группами, потому что в каждом плотном облаке межзвездного газа одновременно рождается много звезд.

Хаотическое взаимодействие одинаковых звезд.

Статистическая физика – та область физики, которая изучает движение и взаимодействие частиц.

Звезды, двигаясь в рассеянных скоплениях сближаются. Влияя своей гравитацией друг на друга, звезды искажают пути полета (рис. 27.5). «Столкновение», т. е. тесное сближение, звёзд изменяет их скорости. Если массы звезд разные, тогда более легкая звезда получает избыточную скорость, а более массивная звезда притормаживает. Об этом говорят общие законы физики: взаимодействующие частицы стараются распределить свою энергию равномерно, чтобы у каждой из них кинетическая энергия была приблизительно одинаковой.

Кинетическая энергия:

$$E_{\text{кин}} = \frac{MV^2}{2}.$$

После прохождения *времени релаксации* звезды распределяются по скоростям по законам статистической механики (рис. 27.6). Такое распределение называется *Максвелловским*.

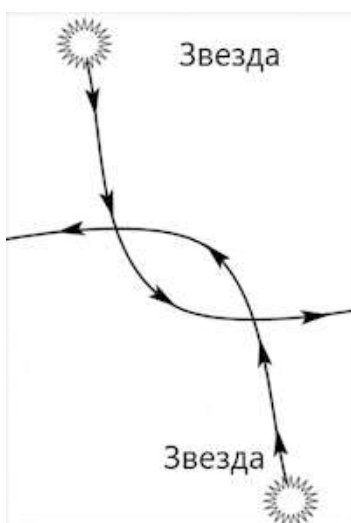


Рис. 27.5. «Столкновение»

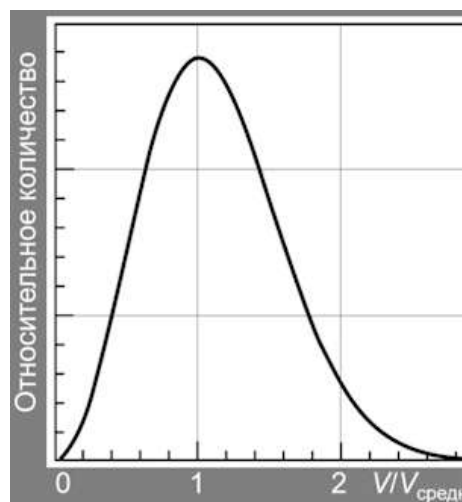


Рис. 27.6. Установившееся
«максвелловское» распределение звёзд
по скорости движения

Распределение молекул по скоростям

Такое распределение имеют не только хаотически движущиеся звезды, но и любые частицы. Например, это явление приводит к тому, что некоторые молекулы в стакане с водой получают большие скорости. Зеленая область на графике (рис. 27.8) называется *Максвелловский хвост*.

Если запереть молекулы воды в стакане (рис. 27.9) – закрыть систему, то отразившись от стенок, молекулы вернуться обратно в стакан. Если систему открыть (рис. 27.10), то постепенно быстрые молекулы начнут улетать, вода начнет испаряться.



Рис. 27.7. Распределение молекул по скоростям

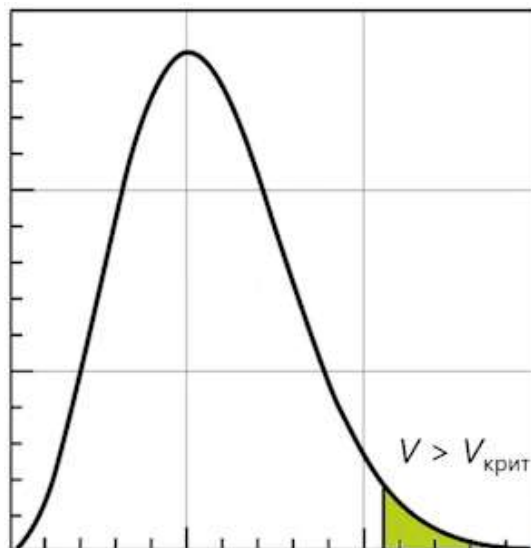


Рис. 27.8. Максвелловский «хвост»



Рис. 27.9. Распределение молекул по скоростям. Быстрые молекулы заперты



Рис. 27.10. Быстрые молекулы свободны

Звездные скопления – это не закрытая система. Поэтому некоторые звезды, покидая скопления, уже никогда в него не возвращаются. Звезды, получившие меньшую скорость, постепенно осаждаются к центру. Этот эффект называется *диссипацией* (рис. 27.11).

Динамическое трение тормозит массивных

Массивный объект (звёздное скопление, крупное газовое облако), движущийся сквозь «толпу» мелких объектов, передаёт им свою энергию, а сам тормозится.



Рис. 27.11. Диссипация («испарение») звёздных скоплений

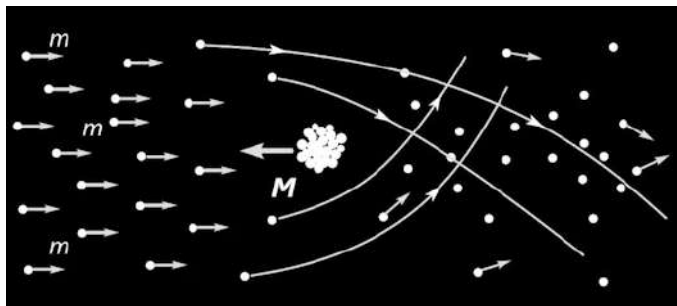


Рис. 27.12. Динамическое трение

Любое звёздное скопление летает вокруг центра галактики, но за счет динамического трения скопления опускаются к центру галактики.

Спиральная галактика – симметрия в системе из сотен миллиардов звёзд.

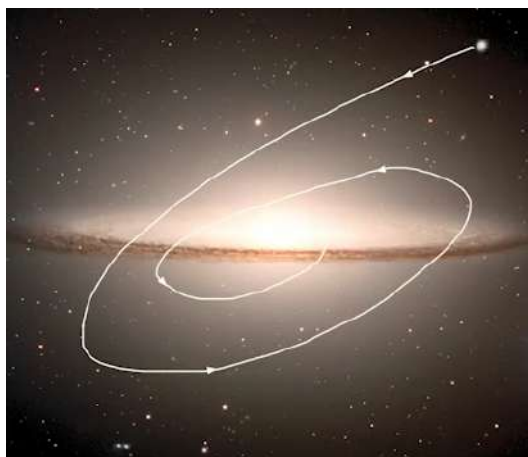


Рис. 27.13. Условная траектория шарового скопления. Галактика Мессье 104. Фото: VLT ESO



Рис. 27.14. Спиральная галактика. NGC 3031. Мессье 81



Рис. 27.15. Самоорганизация звезд и межзвездного вещества в спирали

27..2. Общие характеристики Галактики. Межзвездная и межгалактическая среда

В силу того, что мы живем внутри своей Галактики, общего вида ее – мы не знаем. Все изображения – это рисунки художников, которые представляют Галактику по фактам, собранным астрономами.

Наиболее четко Галактика проявляет себе полосой Млечного Пути, потому что в плоскости галактического диска намного больше ярких звезд – мы тоже живем в этой плоскости.



Рис. 27.16. Галактика Млечный Путь Рис. 27.17. Галактика Млечный Путь

Изучение галактики затрудняется в силу того, что:

1. Галактика – везде – необходимо наблюдать всё небо, 41 253 квадратных градуса (210 100 дисков Луны).
2. Мы внутри Галактики: большой диапазон расстояний от 1 пк до 100 000 пк.
3. Мы находимся в галактическом диске, в слое межзвездной пыли, которая поглощает свет. В направлении на центр Галактики поглощение в оптическом диапазоне достигает 30^m , т. е. из-за поглощения свет ослаблен в 1 триллион раз.

Обычно нашу Галактику представляют на карте, которая очень похожа на карты Земли (рис. 27.18, 27.19).

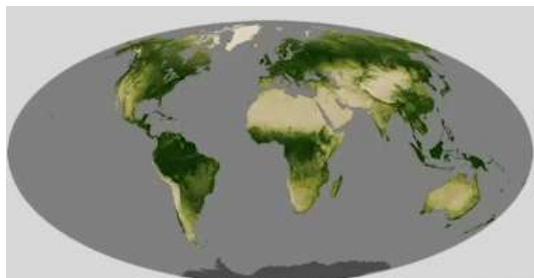
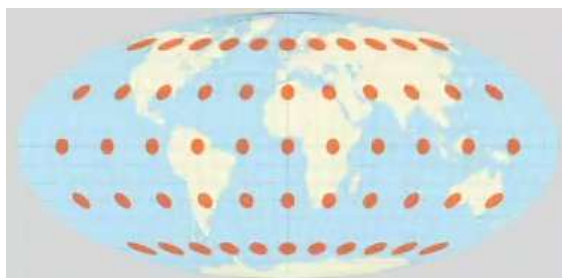


Рис. 27.18. Географическая карта в равновеликой проекции. Сохраняются площади, но не сохраняются углы

Рис. 27.19. Карта Земли

Фотокарта получена в 2018 г. на основе измерения положения и яркости 1,7 млрд отдельных звёзд космическим телескопом Gaia (ESA, 2013).



Рис. 27.20. Полное изображение звёздного неба

Фотокарта, полученная на основе измерений *Gaia* (ESA) в прямоугольной проекции с усиленным контрастом (рис. 27.21). В центре Галактики наблюдается звездное уплотнение и темные пылевые облака.

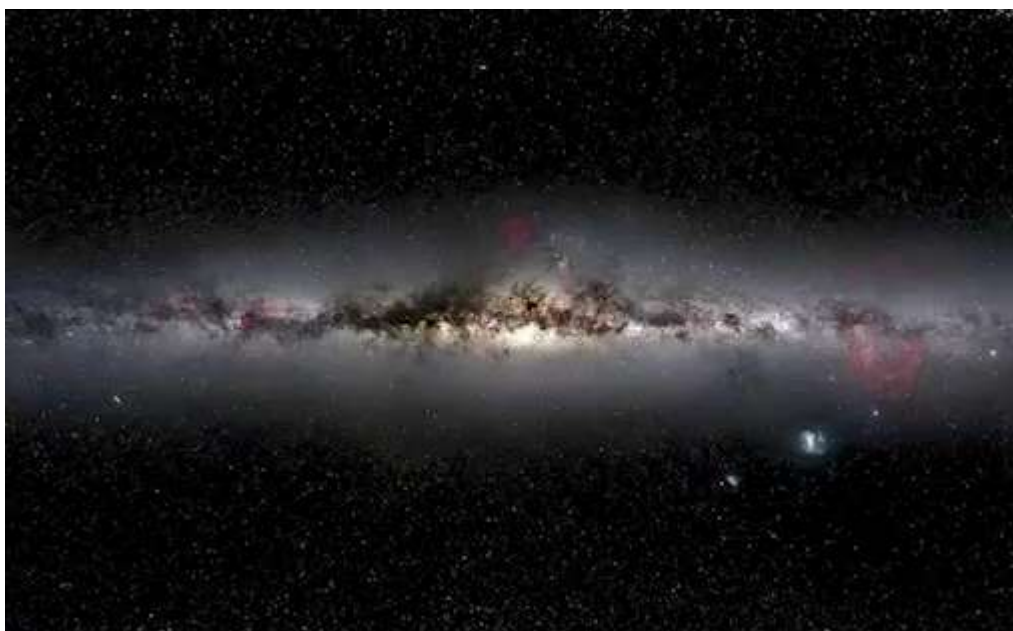


Рис. 27.21. Центральная часть Млечного Пути

Галактика изучена в разных диапазонах излучения (рис. 27.22): в оптическом, в радио, в рентгеновском, в микроволновом. У четырех кадров есть общие детали, однако, например, видно, как карта в оптическом диапазоне отличается от карты, полученной с помощью радиотелескопа на линии 21 см (линия излучения водорода): весь атомарный водород сконцентрирован в плоскости Галактики. Горячий газ находится в основном в центральной области. Самый холодный газ, из которого

образуются звезды, излучает в микроволновом диапазоне. На нижней правой карте видно, что холодный газ прижат к галактической плоскости.

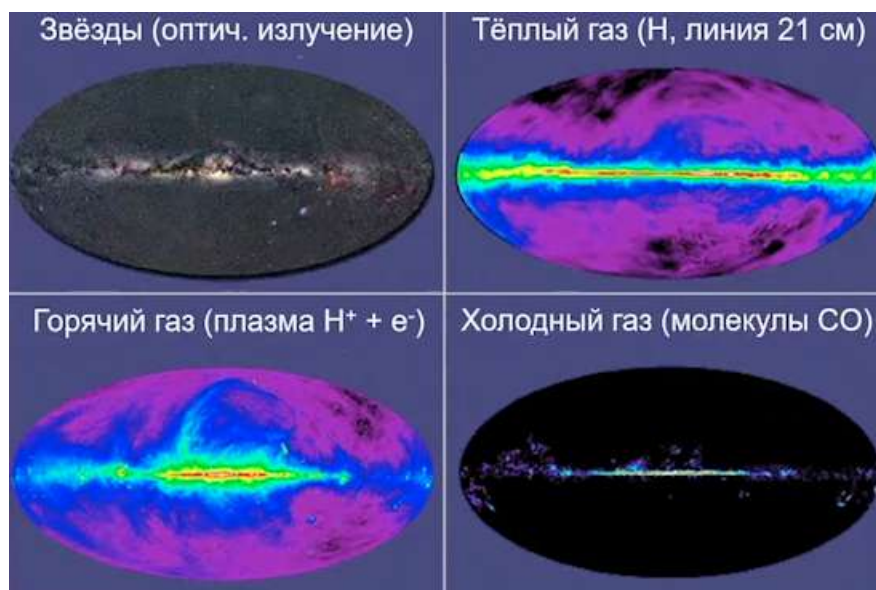


Рис. 27.22. Фотографии галактики в разных диапазонах излучения

В тех местах, где образуются звезды, выбрасывается горячий газ – газовые «фонтаны» (рис. 27.23).



Рис. 27.23. «Фонтаны» над областями звездообразования. Вид Галактики с ребра.

Горячий газ взмывает над диском

Теория галактических «фонтанов» довольно точно описывает циркуляцию газа (рис. 27.24), взлетающего над галактической плоскостью и позже возвращающегося вниз.



Рис. 27.24. Газовые потоки в гало Галактики

Одно явление астрономы пока объяснить не могут. Карта (рис. 27.25) построена по наблюдениям в γ -лучах. γ -кванты – мощные кванты высокой энергии, их может излучать только самый горячий газ. Оказалось, что над центром нашей галактики выплеснулось два потока горячего газа. Причину этого явления пока точно не определили. Вероятно, это мог быть эффектом влияния черной дыры или рождения звезд.

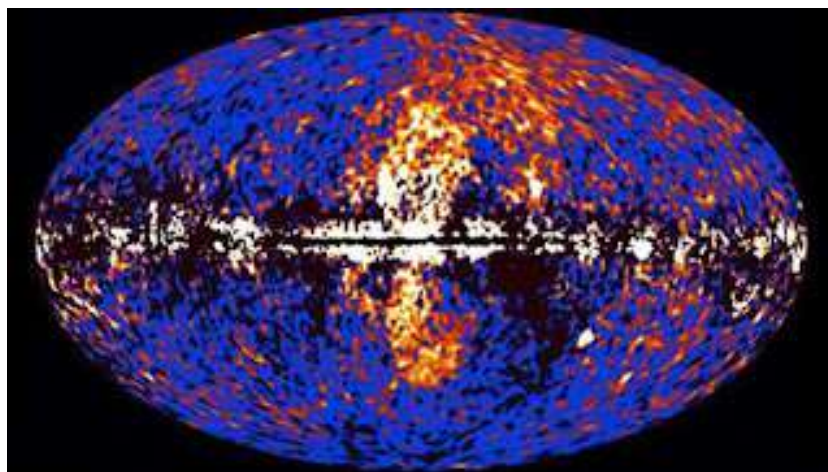


Рис. 27.25. Центр Галактики. Небо в гамма-лучах. Космическая гамма-обсерватория «Ферми» (NASA)

В центре Галактики находится сверхмассивная Черная дыра. Движение звёзд вокруг нее (положение отмечено звездочкой) (рис. 27.26, 27.27). Её масса около 5 млн M_{\odot} .

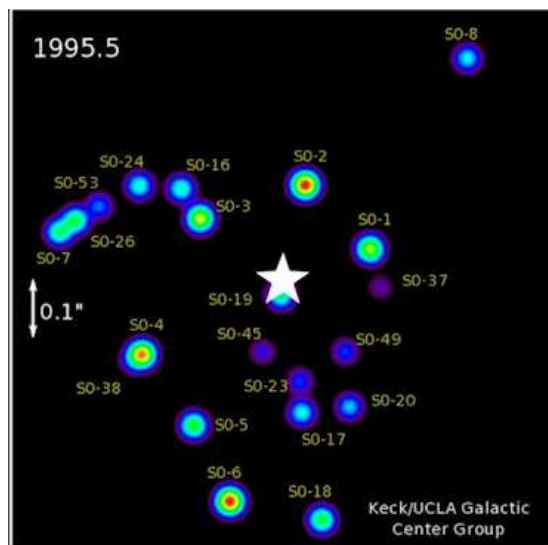


Рис. 27.26. Гигантская черная дыра в центре Галактики

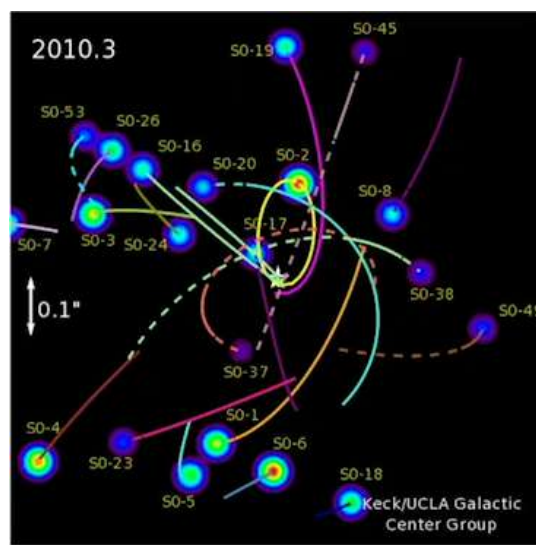


Рис. 27.27. Гигантская черная дыра в центре Галактики

Пространство вокруг галактического диска называется *гало*. Гало – совокупность небольшого количества древних звезд.

Астрономам неизвестно, как выглядит наша Галактика со стороны, однако существует множество изображений художников того, как мы себе ее представляем (рис. 27.29).



Рис. 27.28. Движение звезд в Галактике



Рис. 27.29. Художественное изображение Галактики

Урок 28. Многообразие галактик и проблема тёмного вещества

Еще в начале прошлого века многие поколения астрономов были уверены, что наша Галактика – единственная в природе. Постепенно стало известно, что наша Галактика – гигантская, но не бесконечно большая. Еще размер примерно 100 000 парсек.

28.1. Галактики и их морфология. Взаимодействующие галактики

Морфология галактик

Морфологическая классификация галактик – классификация по внешнему виду. Внешний вид галактики сильно зависит от того, нет ли с ней рядом других галактик (рис. 28.1) – их гравитационное взаимодействие может приводить к изменению внешнего вида.

На фотографии (рис. 28.2) показаны две совершенно разные звездные системы. Оба объекта очень далеки от нас, поэтому отдельных звезд не видно. Одна галактика имеет спиральную форму, вторая – эллиптическую.



Рис. 28.1. Морфология галактик



Рис. 28.2. Разнообразие форм галактик

Внешний вид аморфных бесструктурных галактик различается (рис. 28.3, 28.4). Существуют галактики практически круглые, а бывают заметно вытянутые. Обе галактики – эллиптические, но у галактики на изображении 28.4 эксцентриситет практически равен 0.



Рис. 28.3. Эллиптические галактики.
Мессье 84



Рис. 28.4. Эллиптические галактики.
Мессье 87

Спиральные галактики распадаются на две характерные группы:

- нормальные;
- с баром.

У одних спиральных галактик спиральные ветви выходят из самого центра – это *нормальная спираль*; у вторых – спиральные ветви начинаются от конца звездно-газовой переемычки (*спирали с баром*).



Рис. 28.5. Мессье 74 NGC 628.
Нормальная спираль



Рис. 28.6. NGC 1365. Пересеченная спираль, или Спираль с баром

Первую морфологическую классификацию галактик создал Эдвин Хаббл (рис. 28.7). По его имени она была впоследствии названа.

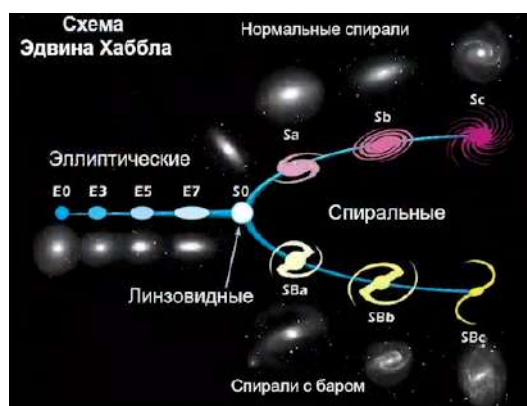


Рис. 28.7. Морфологическая классификация галактик

Классификация довольно простая:

- все эллиптические галактики Хаббл расположил в один ряд по степени сплюснутости – от галактик E_0 (не сжатые) до E_7 (самые сжатые). Галактик типа E_7 практически не бывает;

- спиральные галактики: нормальные и с баром;
- линзовидные (галактики имеют свойства и эллиптических, и спиральных галактик).

Любители астрономии называют такую классификацию Хаббла *камертоном Хаббла*.

Астрономы уверены, что наша Галактика – это спиральная звездная система. На фотографии (рис. 28.8) показана галактика Мессье 81, которая, как кажется астрономам, является аналогом нашей Галактики.

Комментарий: NGC – *New general catalogue* – новый общий каталог туманностей и звездных скоплений.



Рис. 28.8. NGC 3031. Мессье 81



Рис. 28.9. Галактика NGC 1300 с баром

Галактика Млечный путь по представлению астрономов выглядит так, как она изображена на рисунке 28.10. В последние годы считается, что у Галактики есть бар и ее тип SBbc.

Однако, такие простые формы как спираль и эллипсоид не всегда описывают точный внешний вид галактики. Некоторые галактики не имеют определенной формы и называются *иррегулярными* (рис. 28.11).



Рис. 28.10. Галактика Млечный Путь

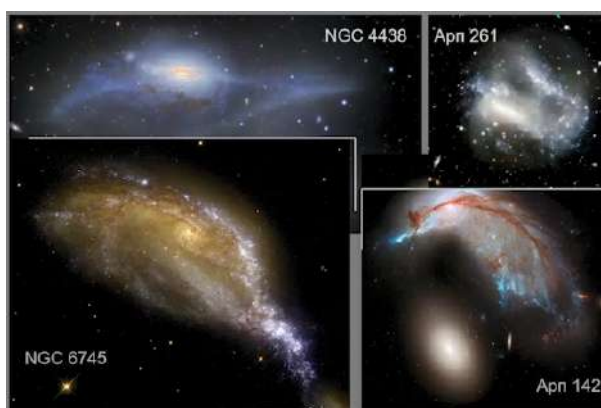


Рис. 28.11. Бесформенные галактики («иррегулярные»)

Существуют галактики, имеющие геометрическую форму, которая не попадает под простые определения. Такие галактики называются *пекулярными* (рис. 28.12).

Существуют галактики, по которым видно, что их сложная форма оказалась результатом взаимодействия двух галактик друг с другом (рис. 28.13).

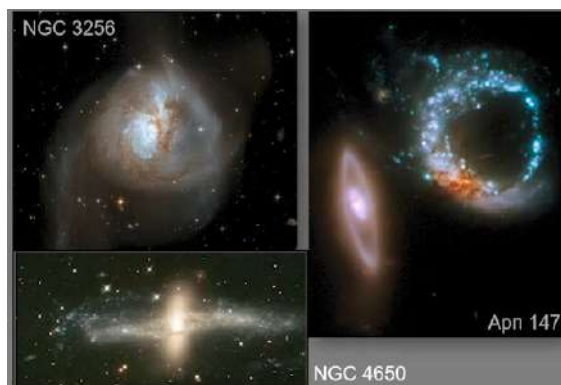


Рис. 28.12. Галактики необычной формы



Рис. 28.13. Взаимодействие двух галактик

На рисунках 28.14-28.19 показано математическое моделирование взаимодействия двух галактик (поэтапно).



Рис. 28.14. Математическая модель взаимодействия двух галактик



Рис. 28.15. Математическая модель взаимодействия двух галактик



Рис. 28.16. Математическая модель взаимодействия двух галактик



Рис. 28.17. Математическая модель взаимодействия двух галактик



Рис. 28.18. Математическая модель взаимодействия двух галактик



Рис. 28.19. Математическая модель взаимодействия двух галактик

28. 2. Местная группа галактик. Проблема скрытой массы (тёмная материя)

В Южном полушарии рядом с великолепным Млечным Путем видны два небольших «облачка» – это самостоятельные галактики, наши соседи.



Рис. 28.20. Магеллановы Облака и Млечный Путь

На фотографии (рис. 28.21) небо в инфракрасных лучах: обзор 2MASS. Полный обзор неба на волне длиной 2 мкм. Калифорнийский технологический институт (Калтех) и Массачусетский университет.



Рис. 28.21. Небо в инфракрасных лучах

Магелланов Поток – газовый и звёздный хвост. На оптическое изображение неба (рис. 28.22) наложена радиокарта распределения нейтрального водорода, связанного с Магеллановыми Облаками.

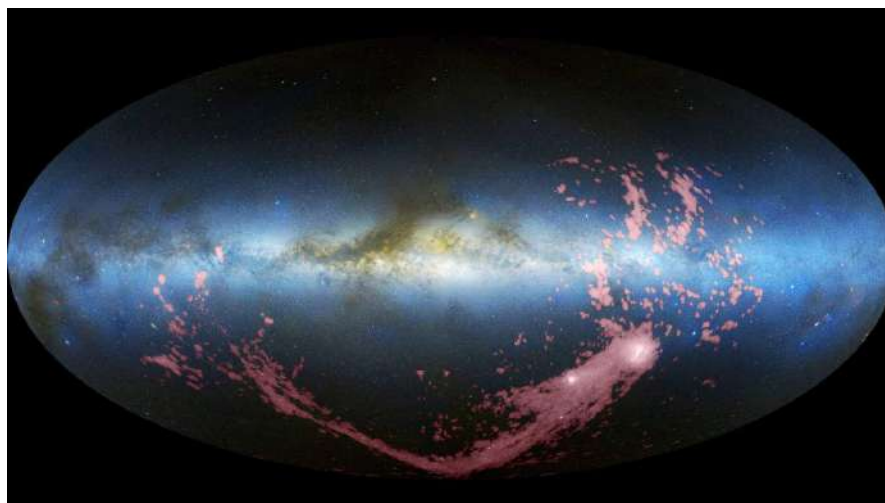


Рис. 28.22. Магелланов Поток

Вокруг области нашей Галактики на далекой периферии видны другие галактики (далее 100 000 парсек).

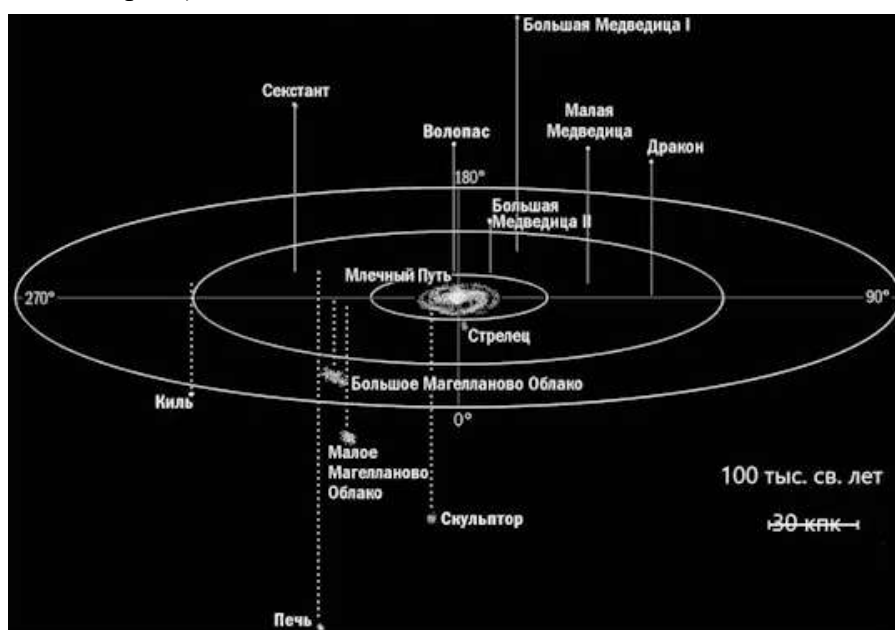


Рис. 28.23. Свободная периферия нашей Галактики

Таким образом, нашу галактику можно представить как центральную плотную часть.

Будущее местной группы галактик

Измерения показывают, что туманность Андромеды приближается к общему центру массы, так же, как и наша Галактика. Через 4 млрд лет эти галактики окажутся друг рядом с другом и еще через 2 млрд лет сольются.

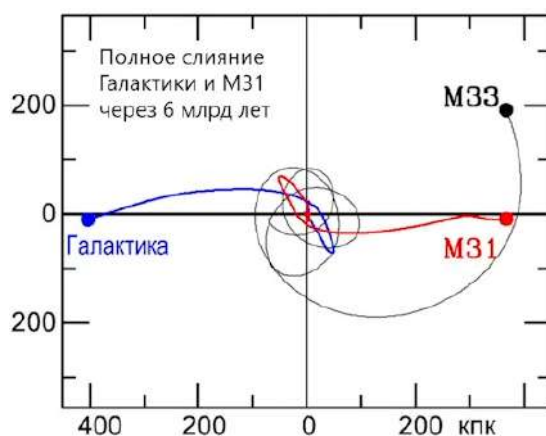


Рис. 28.24. Будущее Местной группы галактик

На моделировании (рис. 2825) показан вид звёздного неба в процессе столкновения галактик Андромеда и Млечный Путь. Весь процесс длится около 6 млрд лет.

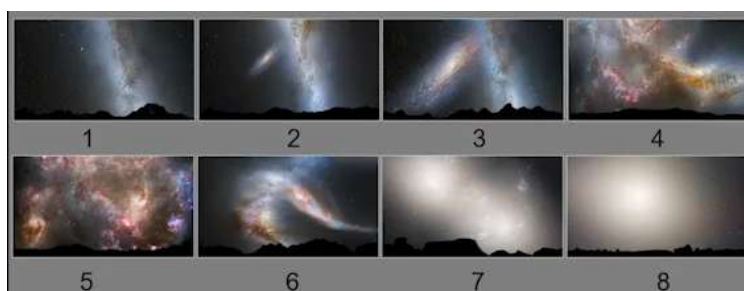


Рис. 28.25. Эволюция Местной группы галактик

NGC 4676A и B, «Мышки» – слияние двух крупных спиральных галактик в созвездии Волосы Вероники на расстоянии 290 млн св. лет от нас. На фотографиях видны приливные «хвосты».



Рис. 28.27. Галактика NGC 5907 – разрушение спутника



Рис. 28.28. NGC 4676A и 4676B – столкновение галактик

Урок 29. Группы и скопления галактик. Гравитационные линзы

Распределение вещества во Вселенной неоднородно. Изображение (рис. 29.1) построено с точки зрения того, что наша Галактика находится в центре. Каждая точка – это крупная Галактика или скопление галактик – нет никакой однородности, везде прослеживаются общие структуры: в некоторых местах собраны более плотные скопления галактик, в других местах более разреженное пространство.

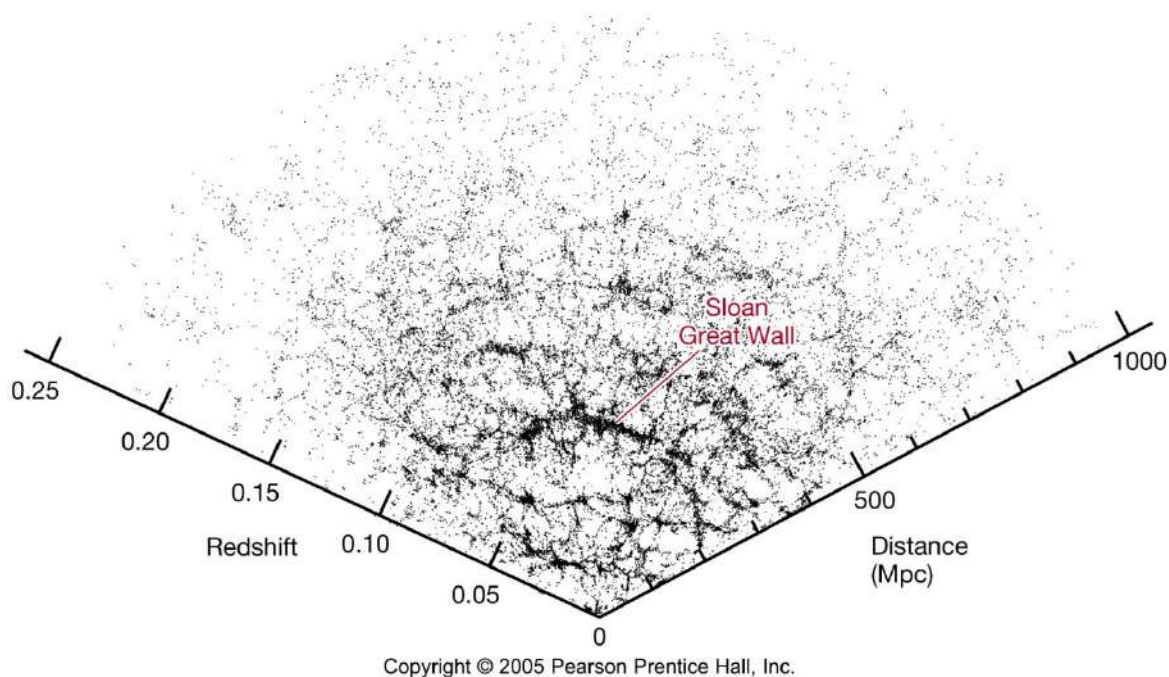


Рис. 29.1. Распределение вещества во Вселенной

29.1. Взаимодействие галактик в группах и скоплениях

Группы галактик

Группы галактик – это сравнительно небольшие области, содержащие несколько галактик.



Рис. 29.2. Группы галактик



Рис. 29.3. Представление художников о Млечном Пути

Так как изучить внешний вид нашей Галактики не представляется возможным, ученые могут лишь сравнивать ее с другими. Так, например, считается, что наша Галактика похожа на спиральную галактику в созвездии Андромеды.

В местную группу галактик входит подгруппа Туманности Андромеды и подгруппа Млечного Пути: между их центрами расстояние примерно 2 млн световых лет. Полный радиус местной группы примерно 3 млн световых лет.

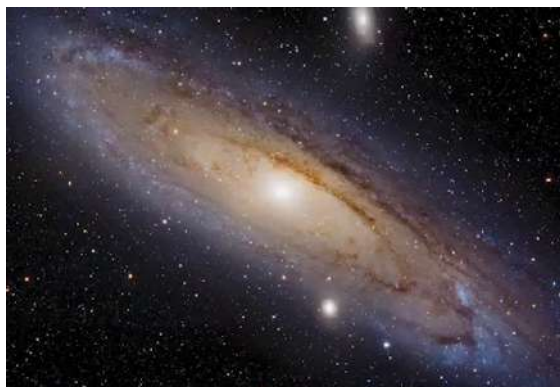


Рис. 29.4. Спиральная галактика в созвездии Андромеды, или Туманность Андромеды, или Мессье 31

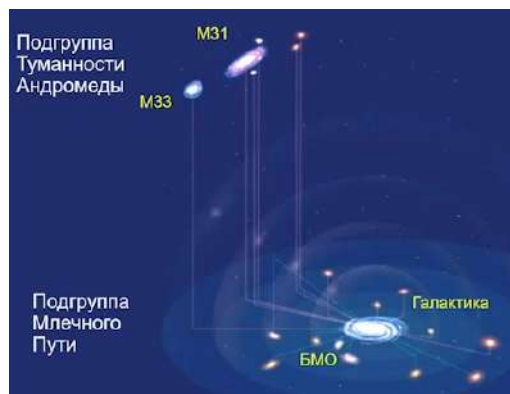


Рис. 29.5. Местная группа галактик



Рис. 29.6. Соседняя группа галактик Мессье 81 на расстоянии 3,6 Мпк (около 12 млн св. лет)

Ближайшая к нам группа галактик – это Мессье 81. Расстояние до нее чуть меньше, чем 4 млн парсек или 12 млн световых лет.

На фотографии (рис. 29.7) показана группа Мессье 81 – галактика Мессье 81 – главная. Рядом с ней видны еще несколько галактик. Небольшие галактики указаны по каталогу NGC, а яркие и более заметные галактики указаны по старому каталогу Шарля Мессье.

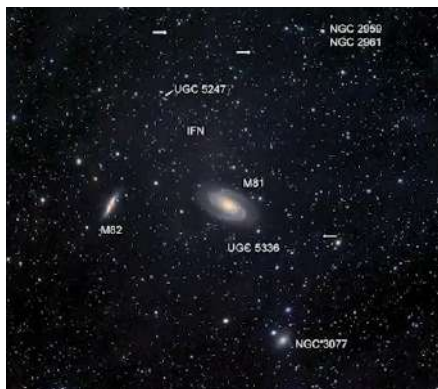


Рис. 29.7. Группа Мессье 81



Рис. 29.8. Мессье 81 и Мессье 82

Приливное взаимодействие в группе галактик M81-M82

Рассмотри скопления галактик в двух типах излучения. Два изображения (рис. 29.9, 29.10) в одном и том же масштабе: оптическое и радиоизображение. На оптической фотографии кажется, что галактики M81, M82, NGC3077 не оказывают друг на друга влияния.

На радиокarte, полученной в радиодиапазоне на длине волны в 21 см, получено, что водород сосредоточен внутри галактик. Но между четырьмя галактиками видны хорошо различимые потоки. Это говорит о взаимодействии галактик друг с другом.



Рис. 29.9. Оптический снимок

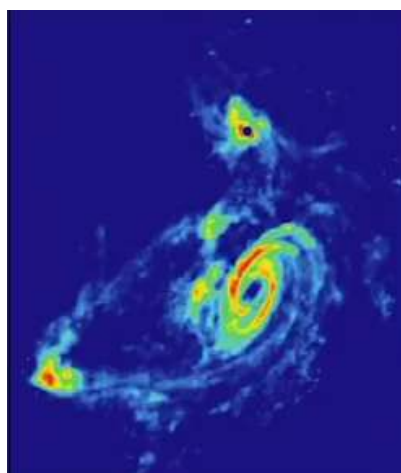


Рис. 29.10. Радиокarta 21 см (HI)

Снимок галактики M82 в инфракрасном диапазоне (рис. 29.11), полученный с помощью телескопа Хаббл, показывает, что из центральной области вырывается два потока горячего газа: в двух перпендикулярных направлениях.

Если наложить на изображение галактики M82 в инфракрасном диапазоне рентгеновское изображение (рис. 29.12), можно окончательно убедиться, что горячий газ вырывается двумя мощными взаимно перпендикулярными потоками.

Внутри этой галактики, вероятно нет черной дыры (в центре). Вероятно, потоки газа вызваны активным формированием большого количества молодых звезд.



Рис. 29.11. M82 в инфракрасном диапазоне



Рис. 29.12. M82 в оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазоне

Скопления галактик – область, населенная множеством галактик, живущими плотным коллективом. Среди крупных скоплений, ближайших к нам – скопление галактик в Деве (рис. 29.15).



Рис. 29.13. Скопление галактик в Деве (Virgo, $N_{gal} \sim 1500$)

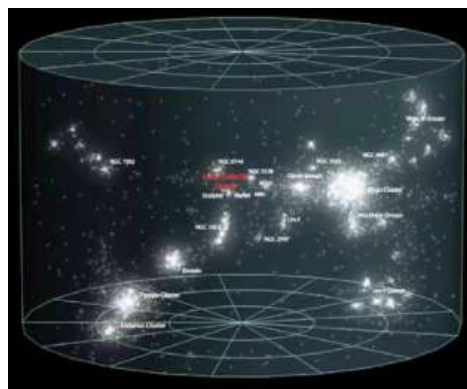


Рис. 29.14. Сверхскопление галактик в Деве

В скоплении галактик в Персее более тысячи членов (рис. 29.15, 29.16).



Рис. 29.15. Скопление галактик в Персее (Virgo, $N_{gal} > 1000$)



Рис. 29.16. Скопление галактик в Персее (Virgo, $N_{gal} > 1000$)

Горячий межгалактический газ в скоплениях

Астрономы получили изображения скоплений галактик в Персее и в Деве в рентгеновском диапазоне (рис. 29.17, 29.18).

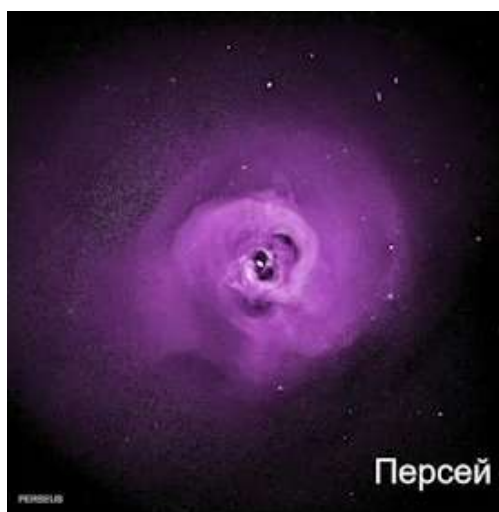


Рис. 29.17. Скопление галактик в Персее

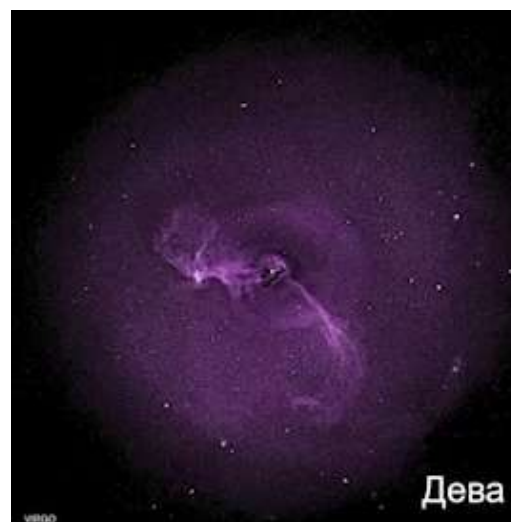


Рис. 29.18. Скопление галактик в Персее

Горячая водородно-гелиевая плазма с температурой $\sim 10^8$ К заполняет крупные скопления галактик и превосходит по массе суммарную массу галактик. Его высокая температур поддерживается активными ядрами галактик.

Изображения в рентгеновском диапазоне: космический телескоп «Чандра» (NASA).

29.2. Гравитационное линзирование и тёмная материя

Проходя вблизи солнечной поверхности, луч света под влиянием гравитационного поля Солнца изменяет направление на $1,75''$. Таким образом, изображение звезды смещается.



Рис. 29.19. Смещение изображения звезды

Гравитационное поле галактики создает эффект линзы для более удаленной галактики, которая могла бы остаться незамеченной. Но её изображение сильно искажается.



Рис. 29.20. Эффект линзы

Явление гравитационной линзы было предсказано в рамках общей теории относительности.

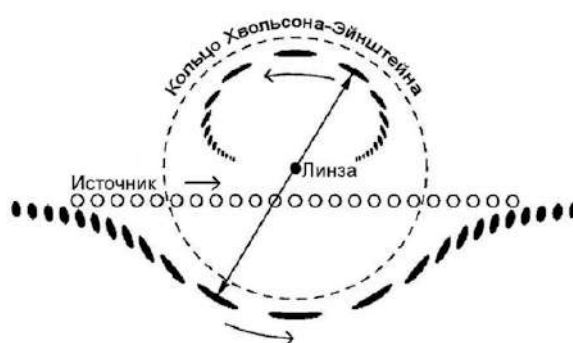


Рис. 29.21. Движение изображений источника света, перемещающегося за гравитационной линзой

Впервые об этом эффекте написал отечественный астрофизик Э. Хвольсон, позже это явление описал А. Эйнштейн. С тех пор это явление называется *гравитационным линзированием* или *явлением Хвольсона-Эйнштейна*.

Изображение 29.21 – идеальное. На самом деле, если смотреть на далекий яркий источник и его лучи света проходят через скопление галактик, то масса распределена хаотически – идеальное кольцо Хвольсона-Эйнштейна получить сложно.

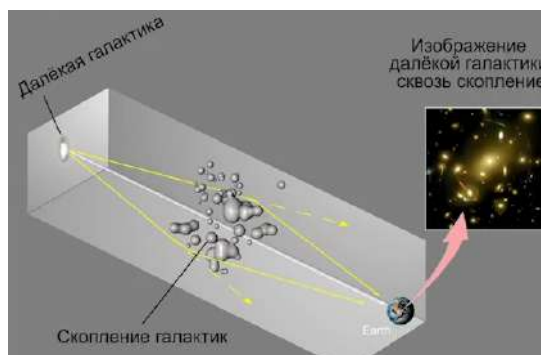


Рис. 29.24. Гравитационная линза

Лекция 30. Структура Вселенной.

На первый взгляд рисунок 30.1 выглядит странно. Однако он отражает почти всю Вселенную, которая изучена на настоящий момент в самые мощные телескопы. Яркие точки – это далекие галактики, удаленные от нас на миллионы и миллиарды световых лет. Темные места – это те места, где звезды нашей Галактики мешают обозреть пространство вокруг них.

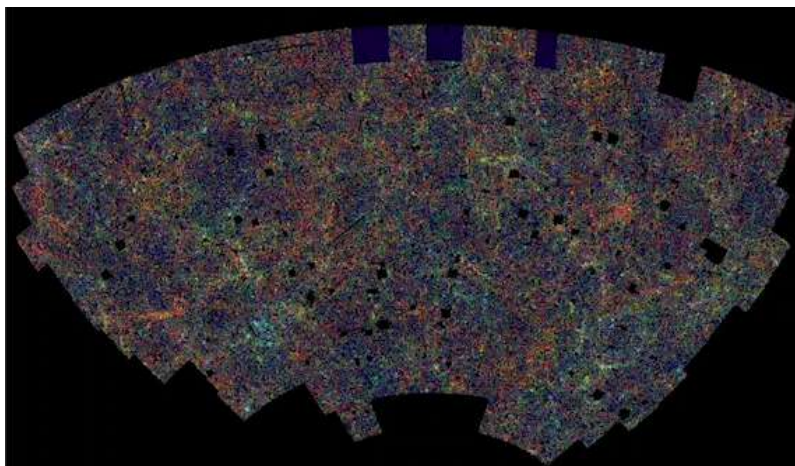


Рис. 30.1. Вселенная

30.1. Красное смещение спектральных линий и закон Хаббла. Крупномасштабная структура Вселенной

По полученным фотографиям можно делать лишь предположения о расстоянии до той или иной галактики. На переднем плане находится спиральная галактика, которая, вероятно, находится ближе всего к нам. Рядом находится эллиптическая система, которая, возможно, находится ближе или на таком же расстоянии. В центре находится небольшая спиральная галактика – она выглядит небольшой, вероятно, по той причине, что она дальше удалена. Но такие суждения – субъективные, потому что глядя на изображения объектов на звездном небе трудно определить истинное расстояние.

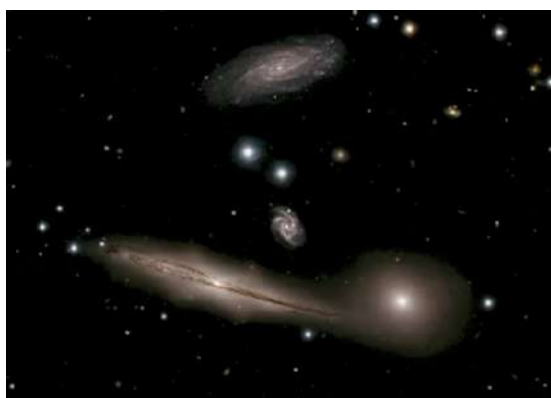


Рис. 30.2. Галактики



Рис. 30.3. Скопление галактик в Персее

Все галактики движутся в пространстве. Именно характер их движения может очень многое рассказать об их положении в пространстве, об их расстоянии, о веществе между ними.

Изучение характера движения

Изучение характера движения звездных объектов состояло в изучении спектра галактик. При удалении источника линии в его спектре смещаются в красную сторону, т. е. их длина волны увеличивается (рис. 30.4). Это результат эффекта Доплера.

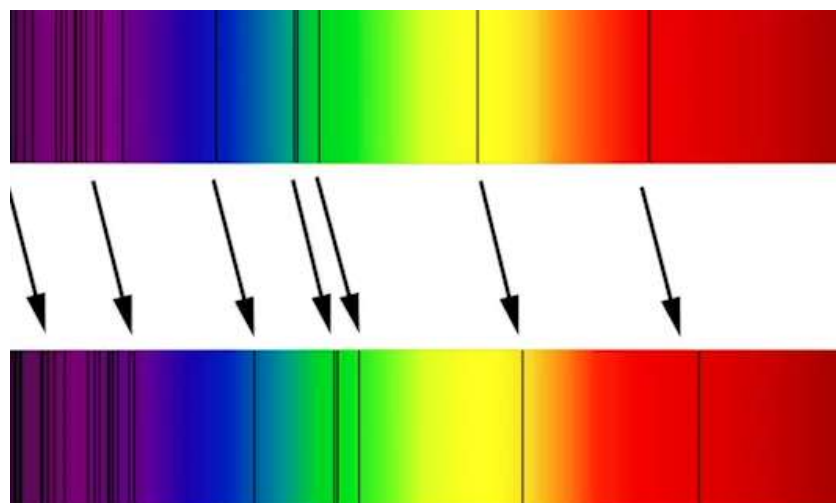


Рис. 30.4. Эффект Доплера в спектре звезды и галактики

Доплеровское смещение линий является индикатором скорости. Если галактика не движется, то линия соответствует положению, предсказанному лабораторными химическими исследованиями. Если галактика удаляется, тогда линия сдвигается вправо: красное смещение спектра, если галактика приближается, то спектр сдвигается влево (синее смещение спектра) (рис. 30.5).

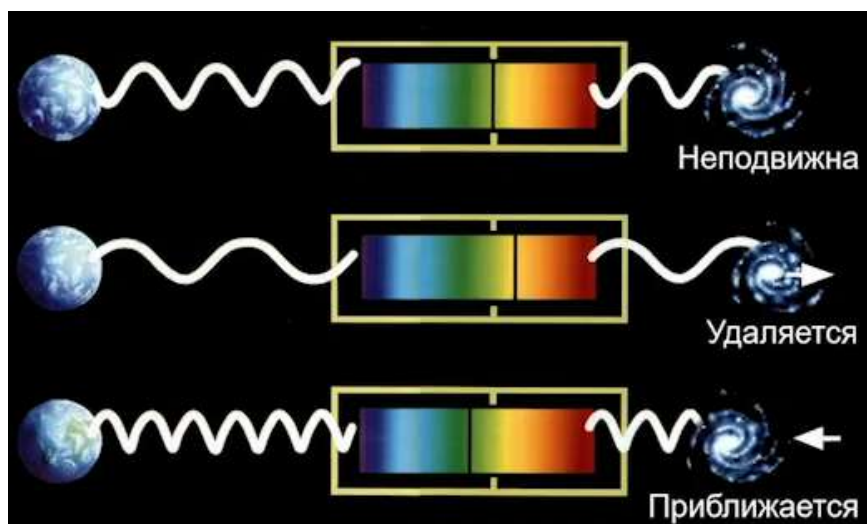


Рис. 30.5. Эффект Доплера в спектре галактики

Пример спектра удаляющейся от нас галактики Квazar 3C 273 показан на изображении (рис. 30.6). Скорость ее удаления от нас 47 400 км/с.

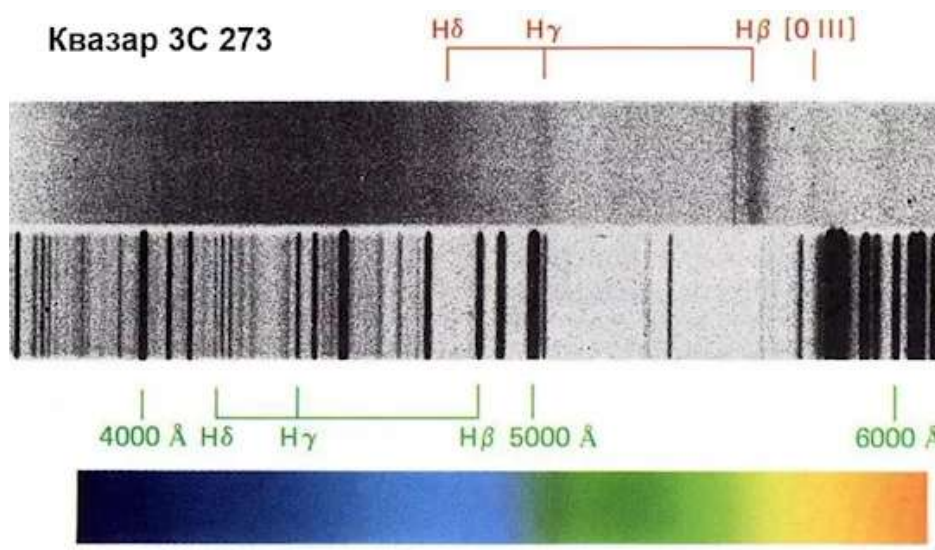


Рис. 30.6. Спектр далёкой галактики

Эффект смещения показан для разных галактик, находящихся от нас на разном расстоянии (рис. 30.7). Желтой стрелкой продемонстрировано насколько по отношению к неподвижному источнику света сдвигается та или иная галактика.

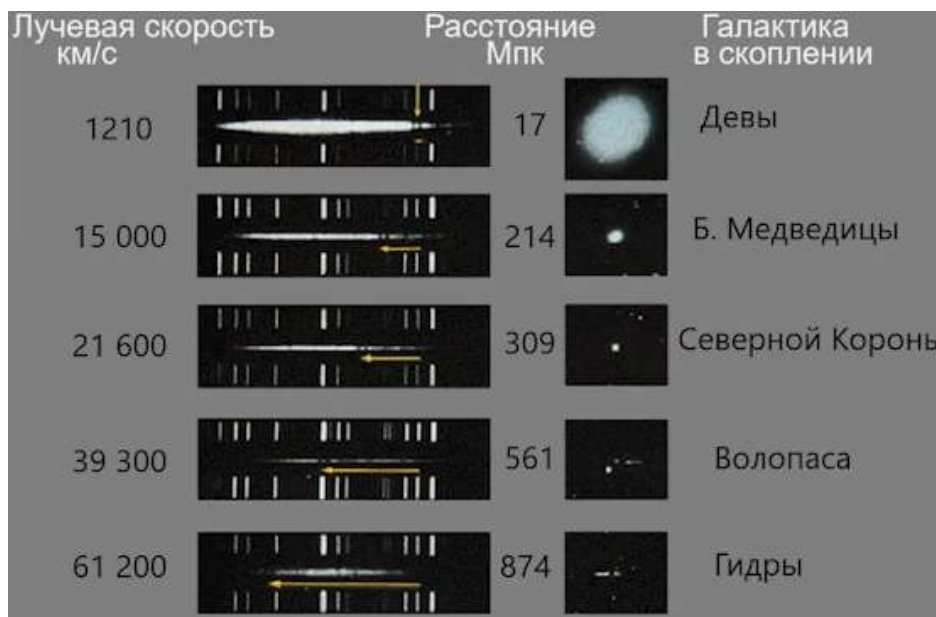


Рис. 30.7. Спектры галактик на разном расстоянии от нас

В 1913-1914 гг. Весто Слайфер, изучая спектры спиральных туманностей (т.е. галактик), впервые измерил их лучевые скорости и обнаружил, что большинство из них удаляется от нас. По фотографиям спектра галактик было понятно, что многие линии смещены в сторону красной зоны.

Так было открыто расширение Вселенной.



Рис. 30.8. Весто Слайфер (1875 – 1969)



Рис. 30.9. Эдвин Хаббл

В 1922-1923 гг., обнаружив переменные звезды-цефеиды в ближайших «туманностях», и измерив таким образом расстояния до них, Хаббл доказал, что это отдельные звёздные системы, расположенные далеко за пределом нашей Галактик.

Исследуя галактики с помощью крупнейшего телескопа, Эдвин Хаббл открыл расширение Вселенной.

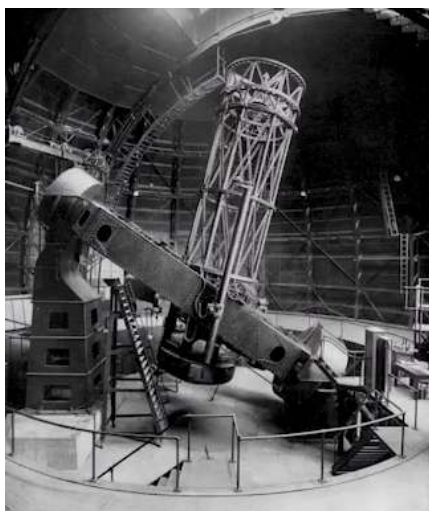


Рис. 30.10. Крупнейший в мире телескоп начала XX века, 100-дюймовый (2,5 метра) рефлексор обсерватории Маунт-Вилсон (Калифорния).



Рис. 30.11. Э. Хаббл в работе с крупнейшим телескопом начала 20 века

Расстояние до ближайших галактик Хабблу удалось определить с помощью цефеид.

Цефеиды – звезды переменного блеска.

Э. Хаббл использовал свойства цефеид, которые испытывают пульсирующее равномерное периодическое изменение яркости. Видимая яркость меняется на половину звездной величины или даже на целую звездную величину (рис. 30.13).



Рис. 30.12. Цефеиды

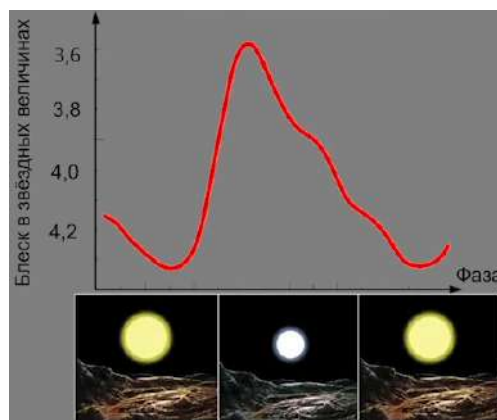


Рис. 30.13. Пульсирующее изменение яркости цефеид

При расширении звезды температура падает, что соответствует минимуму яркости звезды. Максимум яркости достигается, когда, сжавшись, звезда становится более горячей.

Существует зависимость между светимостью цефеиды и периодом колебаний: чем больше период изменения блеска, тем больше светимость цефеиды.

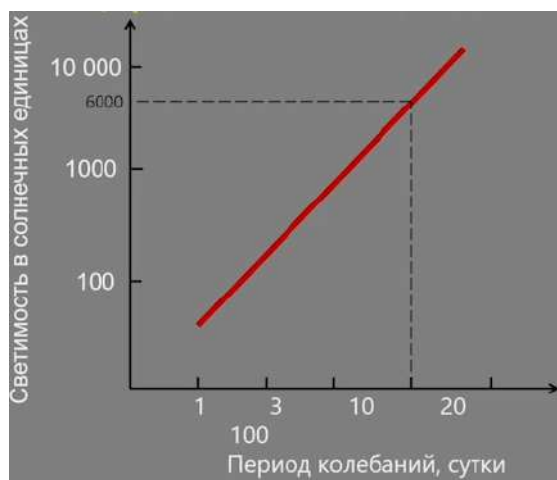


Рис. 30.14. Зависимость светимости цефеиды и периода колебаний

Связь между скоростью и расстоянием

Диаграмма Хаббла 1929 г. (рис. 30.16), демонстрирующая прямо пропорциональную связь между расстоянием до галактики и скоростью её удаления от нас:

$$V = H_0 D$$

Линейная зависимость – неоднозначная, однако просматриваемая. Э. Хаббл решил, что если разброс точек – это случайное движение галактик или ошибки измерений, то в целом просматривается линейный тренд: чем дальше галактика, тем быстрее она движется.



Рис. 30.15. Э. Хаббл

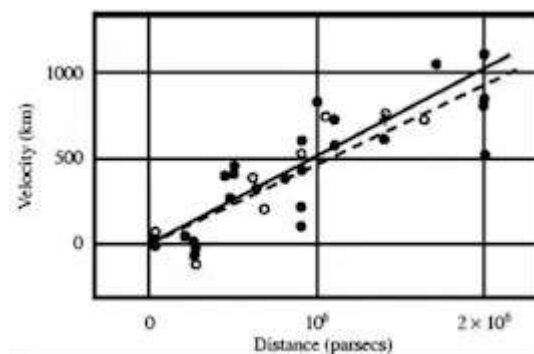


Рис. 30.16. Линейная зависимость между скоростью и расстоянием

Большие межгалактические расстояния

Цефеиды – звезды гиганты, и они видны на больших расстояниях. Но этому есть предел. В некоторых галактиках цефеиды не видны, а астрономам хочется измерить расстояние. Тогда используются другие методы, например, методы стандартной свечи и стандартного отрезка.

Метод стандартного отрезка подразумевает измерение расстояния по угловому размеру. Метод стандартной свечи значительно надежнее, но требует априорных предположений. Этот метод использует специальную шкалу космических расстояний (рис. 30.17).



Рис. 30.17. Шкала космических расстояний

Рассмотрим фотографии галактики Мессье 51 (рис. 30.18). Левое изображение отличается от правого. Белые появляющиеся и исчезающие точки – это взрыв сверхновых звезд. По их видимой яркости определить расстояние до этой спирали Мессье 51.



Рис. 30.18. Галактика M51

Внешне взрыв звезды проявляется так, что яркость звезды за несколько суток резко возрастает, затем в течение года падает и стремится к минимуму. Пиковая яркость сверхновых звезд типа 1A практически одинаковая.

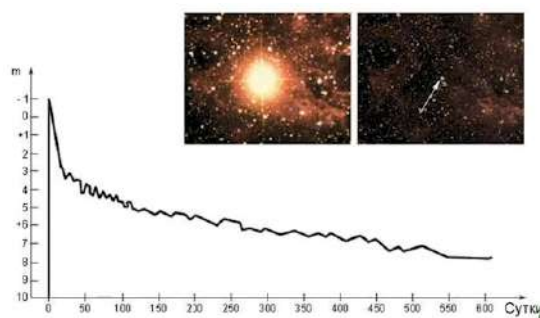


Рис. 30.19. Кривая блеска сверхновой

Вспышки сверхновых звезд позволяют измерять расстояния до очень далеких галактик. Современная зависимость показана на рисунке 30.20.

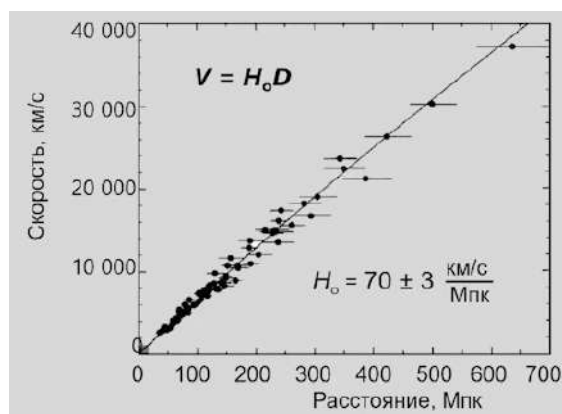


Рис. 30.20. Закон Хаббла «скорость – расстояние»

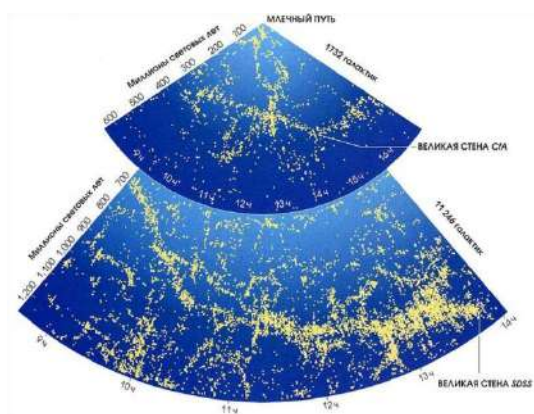


Рис. 30.21. Крупномасштабная структура Вселенной

Распределение миллионов галактик по всему небу показано на фотографии (рис. 30.22). Обзор в инфракрасных лучах с длиной волны 2,2 мкм.

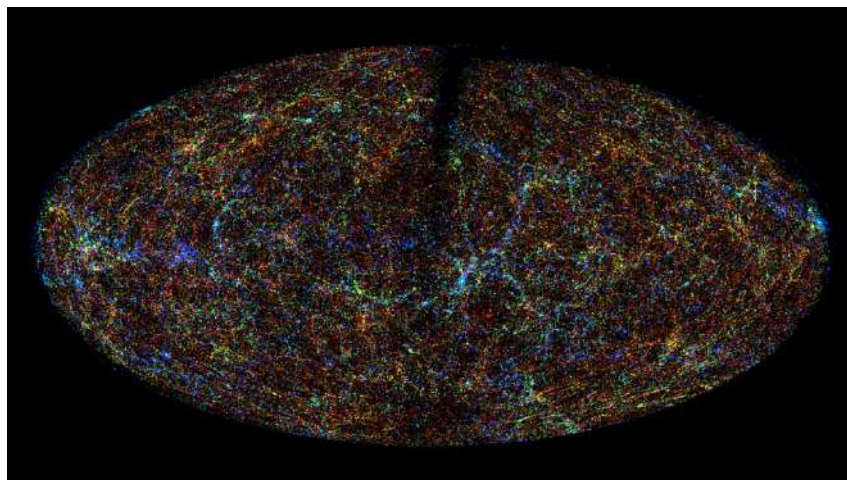


Рис. 30.22. Крупномасштабная структура Вселенной

Урок 31. Рождение и юность Вселенной

В астрономии есть одна особенность: чем дальше от нас объект, тем в более глубоком прошлом мы его наблюдаем. Так, например, Луну мы видим такой, какой она была примерно 1 секунду назад – свет от Луны до нас идет чуть более 1 секунды. Свет от Солнца идет около 8 минут, значит мы видим Солнце таким, каким оно было 8 минут назад.

31.1. Большой взрыв. Формирование вещества и реликтового излучения

В научно-популярных книгах или статьях часто говорят о том, что был Большой взрыв, читатель понимает, что это условное понятие момента рождения Вселенной. Демонстрация большого взрыва подобно взрыву фейерверка (рис. 31.2) – неправильна. Взрыв гранаты/бомбы/фейерверка – неоднородный процесс.

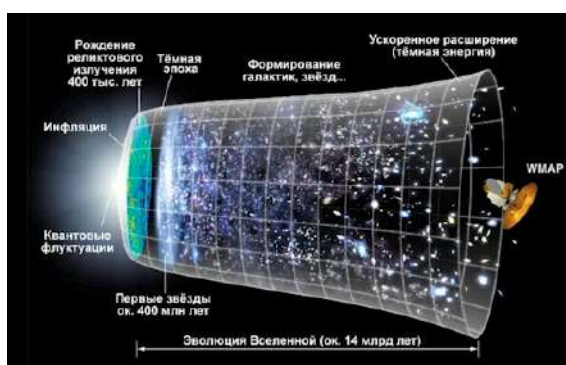


Рис. 31.1. Эволюция Вселенной

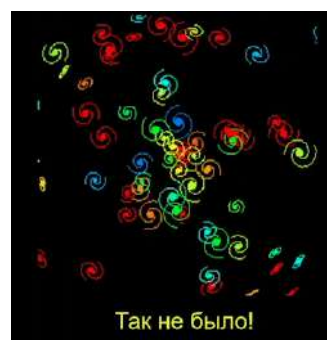


Рис. 31.2. Представление Большого взрыва

В больших масштабах Вселенная – однородна. Поэтому модель расширения вселенной более похожа на надувание шара. При надувании шара скорость взаимного удаления меток-«галактик» подчиняется закону Хаббла:

$$V = kD$$

Расширение происходит однородно, при наблюдении из любой точки – одинаково. Мы не в центре Мира.

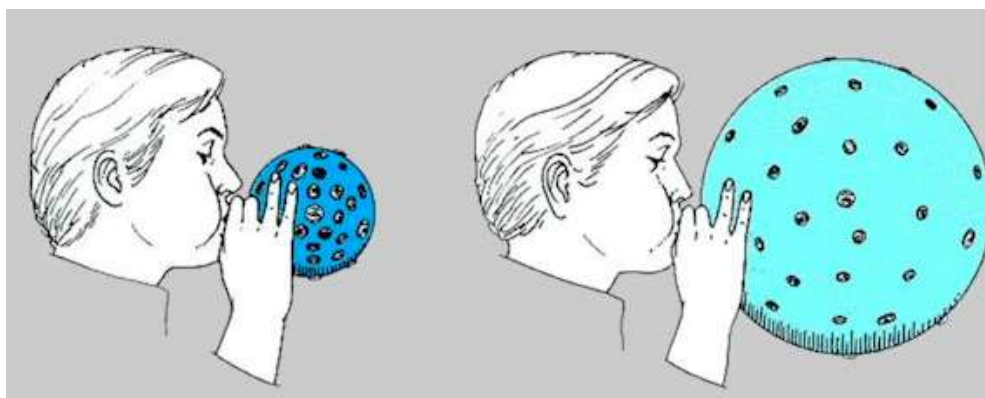


Рис. 31.3. Двумерная модель расширения Вселенной

Если в современном мире система галактик расширяется, значит в прошлом вещество было плотнее (рис. 31.4). Насколько плотнее ученые пока не выяснили.

Астрономы вынуждены говорить о сингулярном состоянии нашего мира. Примерно 14 млрд лет назад мир был одинаково плотным (точки не было) и более однородным, чем сегодня. Никто не может сказать, как далеко распространяется Вселенная за пределы 14 млрд лет.

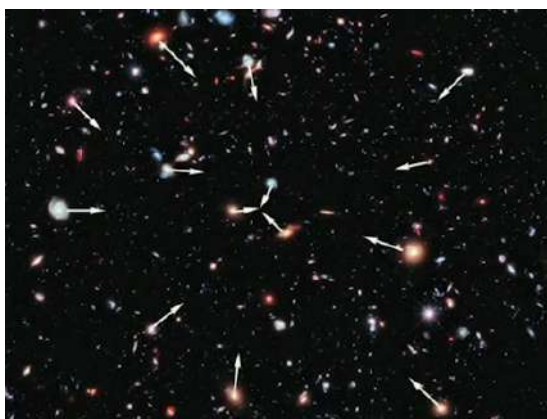


Рис. 31.4. Галактики в прошлом

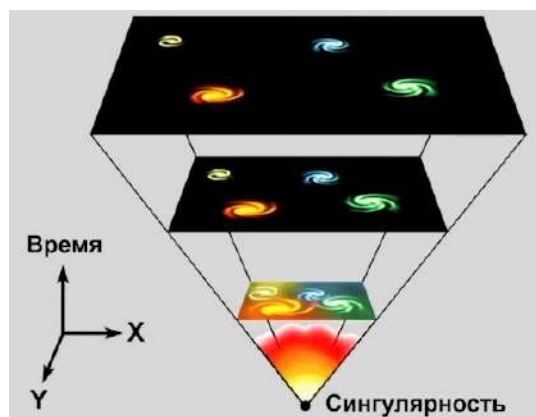


Рис. 31.5. Сингулярное состояние мира

На графике (рис. 3.16) показана кривая изменения взаимного расстояния между галактиками со временем – это характерная величина, которая показывает, насколько сильно Вселенная расширилась. Если в нашу эпоху мы наблюдаем, что мир расширяется, значит можно говорить о том, что он начал расширяться какое-то конечное время назад от какого-то плотного состояния. Как будет дальше развиваться процесс расширения – пока не понятно.



Рис. 31.6. Эволюция Вселенной под действием гравитации

Вселенная наполнена в основном газообразным веществом. При сжатии газ нагревается (рис. 31.7) адиабатически (без потери энергии).

В первые мгновения после Большого взрыва при огромной температуре рождались кварки, из которых к концу 1-й секунд сформировались протоны и нейтроны. Свободный нейтрон нестабилен (период полураспада около 10 мин), но тогда их было много, и быстро шёл термоядерный синтез. Через 5 минут температура упала, и синтез затух. Остались H и He.



Рис. 31.7. Процесс сжатия газа (на примере накачивания шины)

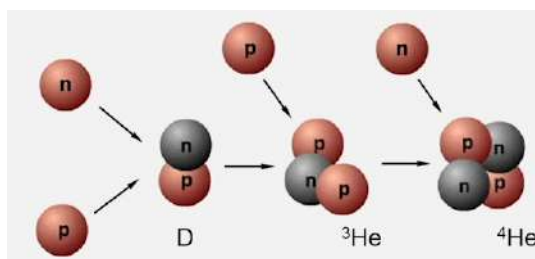


Рис. 31.8. Сближение ядер атомов

Термоядерный синтез в недрах звёзд (превращение водорода в гелий):

1 этап. Соединение двух протонов.

2 этап. Один из протонов превращается в нейтрон .



Рис. 31.9. Первый этап термоядерного синтеза

Рис. 31.10. Превращение одного из протонов в нейтрон

3 этап. Превратившись в нейтрон и выбросив положительный заряд и нейтрино получается дейтерий

4 этап. Дейтерий присоединяет протон и получается легкий гелий.



Рис. 31.11. 3 этап термоядерного синтеза

Рис. 31.12. 4 этап термоядерного синтеза

5 этап. Два легких гелия встречаются, объединяются на некоторое время, и тут же выбрасывают лишние электрически-заряженные частицы и остается одно ядро гелия (α -частица).

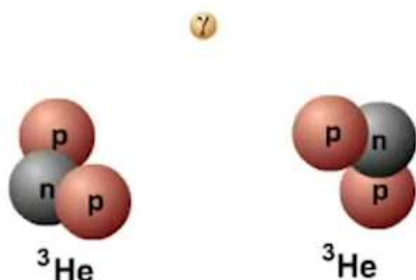


Рис. 31.13. 5 этап термоядерного синтеза

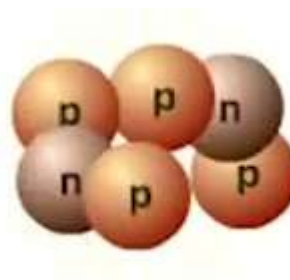


Рис. 31.14. 5 этап термоядерного синтеза

Самый медленный этап в цепочке реакций – превращение протона в нейтрон. Но в начале жизни Вселенной этот этап не требовался.

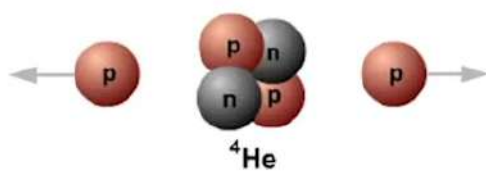


Рис. 31.15. 5 этап термоядерного синтеза

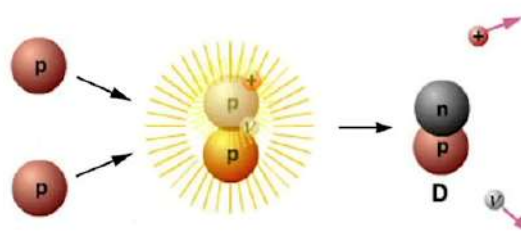


Рис. 31.16. Термоядерный синтез

Вселенная расширялась, температура падала и уже через 200 секунд температура упала до такого состояния, что термоядерные реакции прекратились.

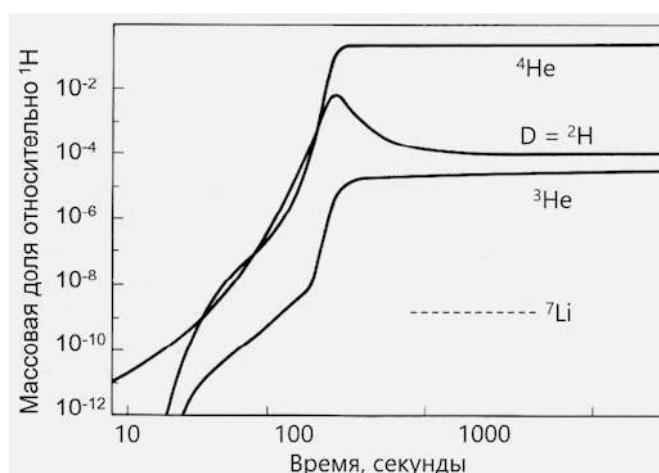


Рис. 31.17. Рождение вещества (первые 5 минут)

Эпоха рекомбинации

Горячий газ (плазма) поглощает электромагнитные кванты. Расширяясь, плазма остыла и превратилась в нейтральный газ, прозрачный для излучения, которое мы сегодня видим. Примерно 400 тысяч лет назад вещество остыло до 3000 К.

Реликтовое излучение Вселенной: $T = 2,728 \text{ К}$.

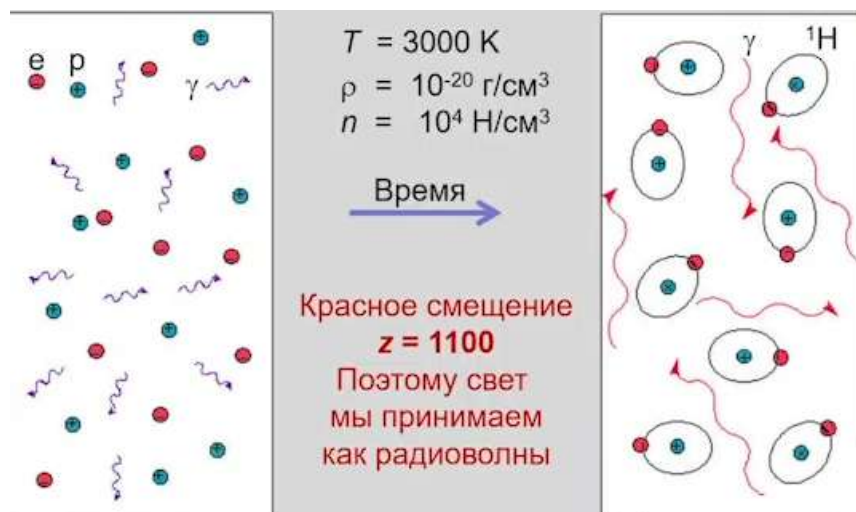


Рис. 31.18. Превращение водорода в атомарный газ

Первыми зафиксировали реликтовое излучение американские радиоастрономы в 1965 г. Арно Пензиас и Роберт Вилсон. Они получили Нобелевскую премию в 1978 г.

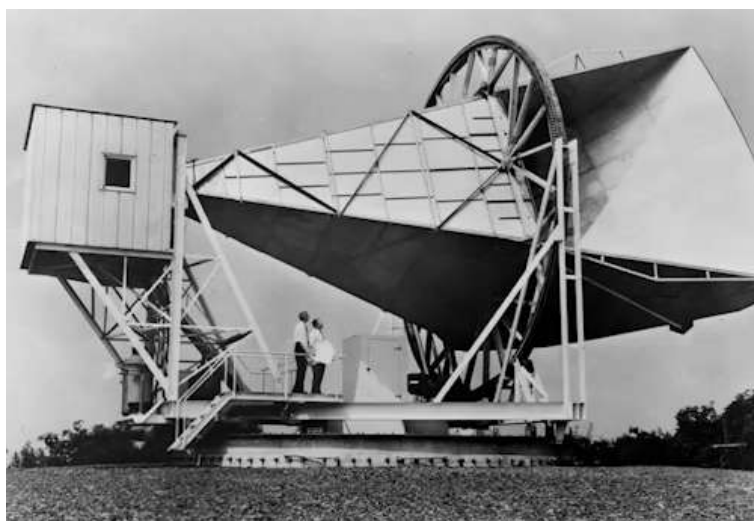


Рис. 31.19. Арно Пензиас и Роберт Вилсон, 1965 г.

31.2. Рождение галактик. Тёмная материя

Наземные телескопы показали, что Вселенная с точностью до 1% одинаково теплая во всех направлениях.

На уровне 0,1% заметно движение Местной группы относительно реликтового излучения, т.е. относительно космологического фона.

Распределение температуры реликтового излучения по небесной сфере в радиодиапазоне казалось одинаковым. Однако позже обнаружилось, что одна половина неба чуть более теплая, чем другая. Разница в температуре составляет 3,353 мК.

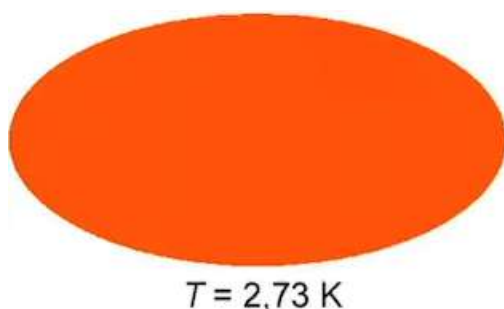


Рис. 31.20. Распределение температуры реликтового излучения по небесной сфере в галактических координатах

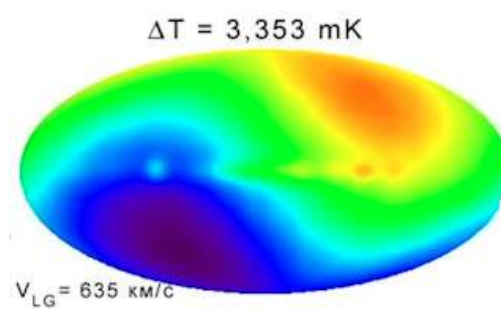


Рис. 31.21. Разница температуры в разных частях небесной сферы

Позже в космос были выведены радиотелескопы микроволнового диапазона, которые смогли зафиксировать более тонкие изменения температуры.

Относительные изменения температуры слишком малы и астрономы стали задаваться вопросом: как из маленьких колебаний плотности излучения вещества могли появиться галактики и скопления. Математические модели показывают, что это было возможно. На рисунке 31.22 показан срез математической модели.

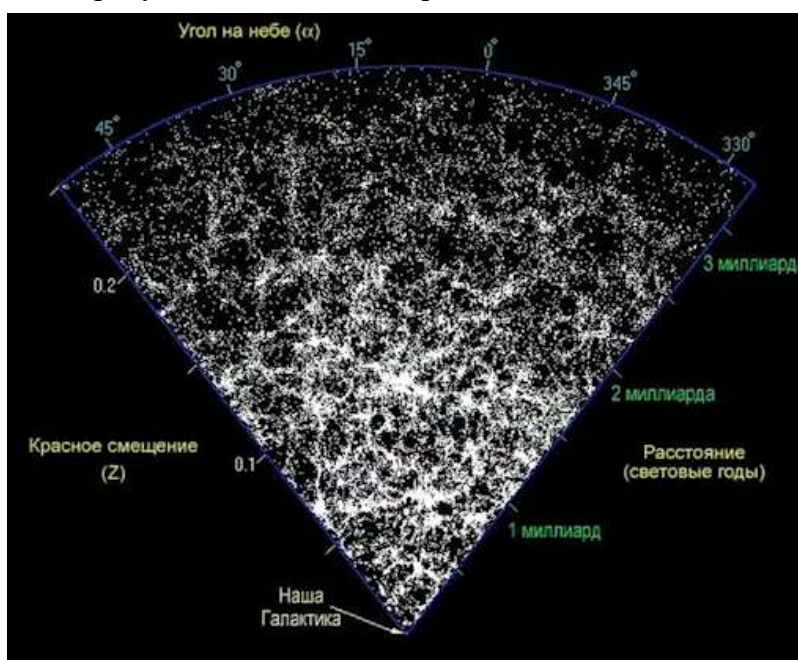


Рис. 31.22. Распределение галактик в пространстве

В математической модели была заложена большая плотность вещества. Но в химических моделях подразумевается, что такого большого количества вещества не

было, иначе бы мир был устроен по-другому. Значит было вещество не обычного состава, но обладающего гравитацией. Это была темная материя.

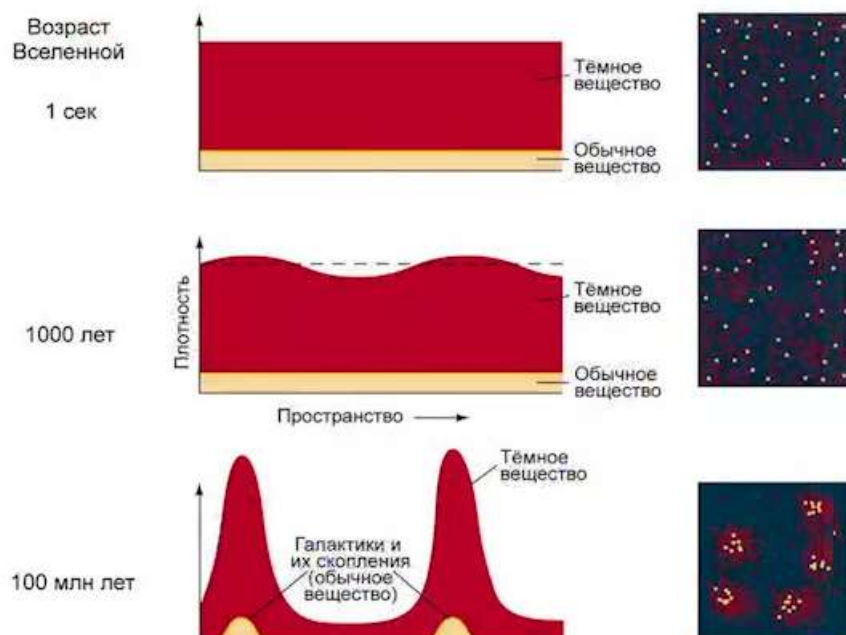


Рис. 31.23. Представление темной материи

В эпоху рекомбинации (возраст Вселенной всего около 400 тыс. лет) соотношение между темным веществом и другими видами вещества было примерно таким же, какое сейчас. К настоящему моменту излучение практически остыло, нейтрино потеряло свою энергию. Фактически остались протоны и нейтроны, из которых состоит наш мир и большую часть мира сегодня составляет темное вещество.



Рис. 31.24. Соотношение между темным веществом и другими видами вещества

Формирование галактик: от малых к большим

В самом далеком прошлом уже сформировались галактики, но они были небольшие и были похожи на современные Магеллановы облака.

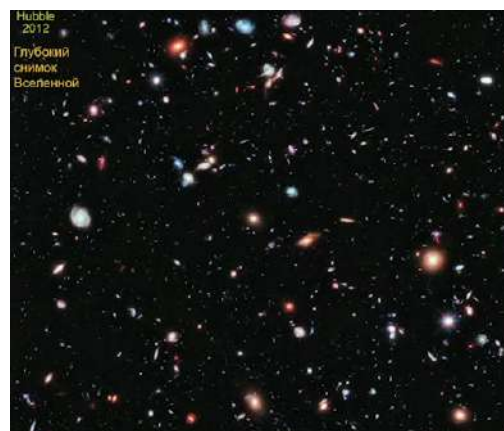
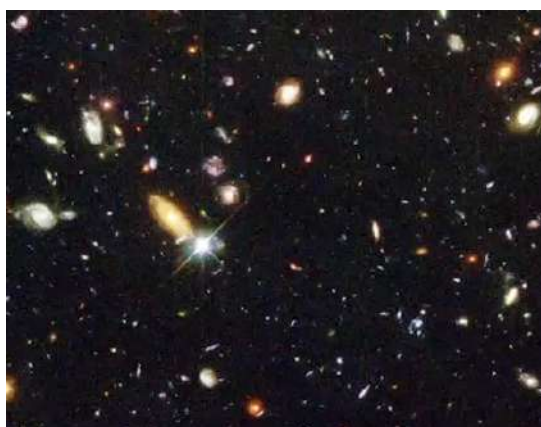


Рис. 31.25. Глубокий снимок Вселенной Рис. 31.26. Глубокий снимок Вселенной

Мелкие галактики первого поколения «строительные блоки» современных крупных галактик.

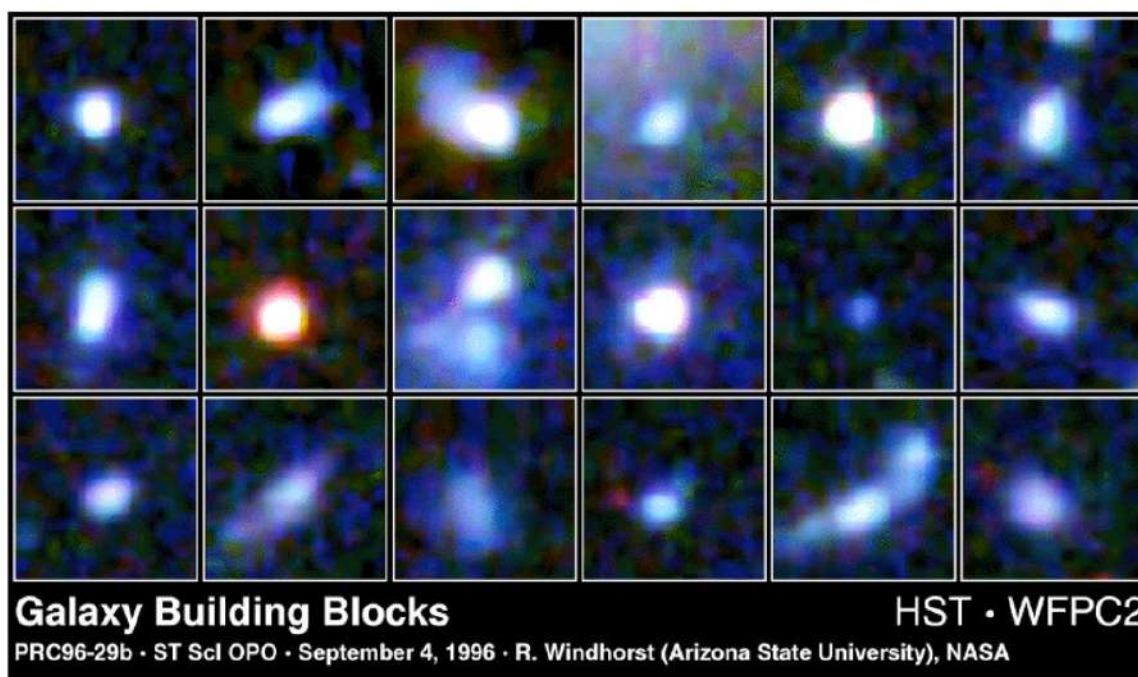


Рис. 31.27. Протогалактики

Каждая крупная галактика окружена мелкими спутниками, которые она постепенно поглощает (галактический каннибализм).

Урок 32. Будущее Земли, Солнечной системы и Вселенной в целом

32.1. Будущее Солнечной системы

Планетная система все время эволюционировала. Сегодня мы изучаем Вселенную такой, какой она представляется через 5 млрд лет после рождения.

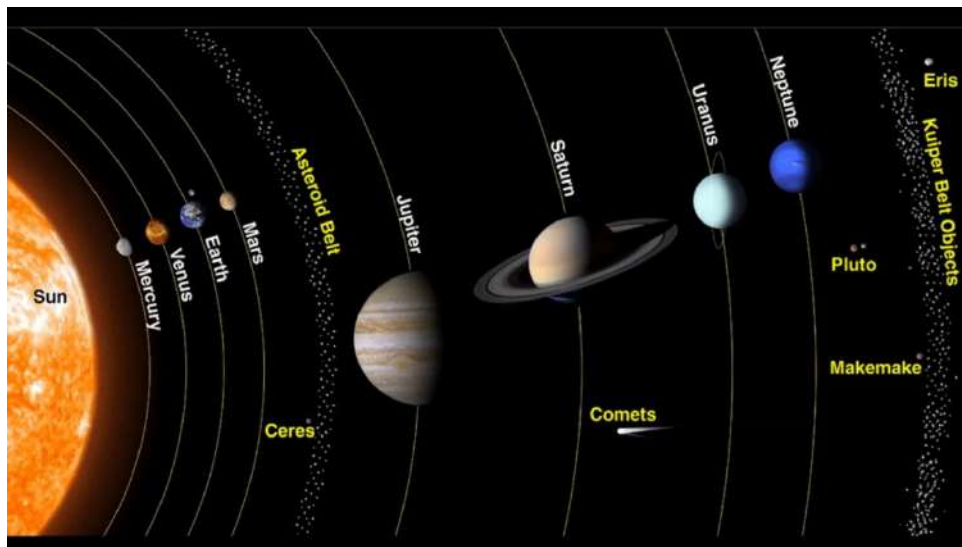


Рис. 32.1. Планетная система в настоящее время

Эволюция Земли и Солнечной системы

В эволюции Солнечной системы можно выделить две группы факторов:

- неизбежные;
- случайные.

Неизбежные факторы обязательно произойдут и мы, вероятнее всего, сможем предвидеть их. Случайные факторы же могут случиться, а могут не случиться – их предвидеть невозможно. На больших промежутках времени даже маловероятная случайность как правило происходит.

Неизбежные факторы

Прежде всего наша планета теряет летучие вещества, т.е. атомы, которые быстро движутся в атмосфере нашей Земли (атомы водорода). Атомы водорода – самое подвижное вещество и при одной и той же температуре движутся быстрее всех, а значит, у них есть способность легче всех улетать из атмосферы Земли.

В атмосфере водород появляется в виде паров воды. Пары воды из океана поднимаются в стратосферу, где ультрафиолетовые солнечные лучи расщепляют молекулу воды на водород и кислород. Водород, как более легкий, улетаёт в космос: 3 кг/сек водорода теряет наша Земля. Таким образом, через несколько миллиардов лет наша планета лишится воздушной и водяной оболочки – исчезнет Мировой океан и атмосфера (рис. 32.2). Т.е. планета высохнет до предела. А если на поверхности планеты не будет воды, то не будет и жизни.



Рис. 32.2. Эволюция Земли

Этот процесс наблюдается астрономами почти невооруженным взглядом. Атомы водорода ярко излучают в некоторых ультрафиолетовых линиях. Поэтому на фотографиях Земли издалека видно, что Земля испаряет свою атмосферу и отпускает водород в космическое пространство (рис. 32.3).

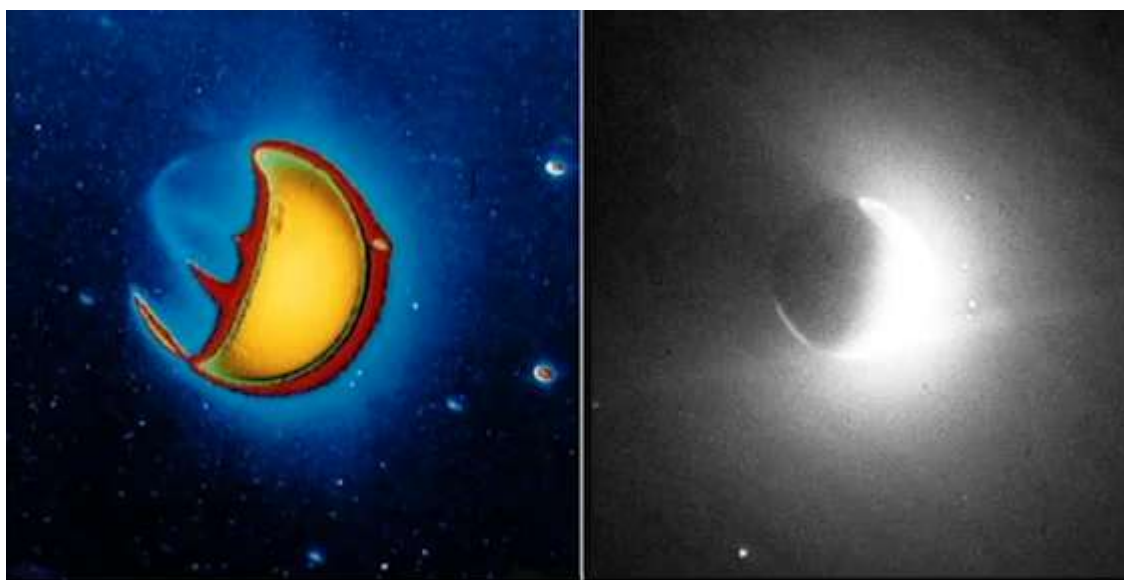


Рис. 32.3. Фото Земли в далеком УФ-диапазоне, полученное в 1972 г. с Луны
астронавтами "Аполлона-16"

Кроме того, Земля нагревается все сильнее и сильнее. Каждый 1 млрд лет светимость Солнца увеличивается примерно на 10%. Через несколько миллиардов лет Солнце станет мощнее нагревать Землю, в результате чего температура на поверхности земли возрастет до такой степени, что земля высохнет и сгорит (рис. 32.4).



Рис. 32.4. Иллюстрация художника: «Красный гигант сжигает поверхность Земли»

Расчеты, которые в последние годы провели астрономы показывают еще более трагическое будущее жизни нашей планетной системы. На графике (рис. 32.5) показаны последние миллионы лет жизни нашего Солнца: поверхность Солнца будет расширяться. С поверхности Солнца будет улетать достаточно много газа и его масса будет постепенно уменьшаться. По вертикальной шкале графика отложены астрономические единицы, по которым можно увидеть, в какой момент радиус Солнца достигнет орбиты планет, в том числе и Земли.

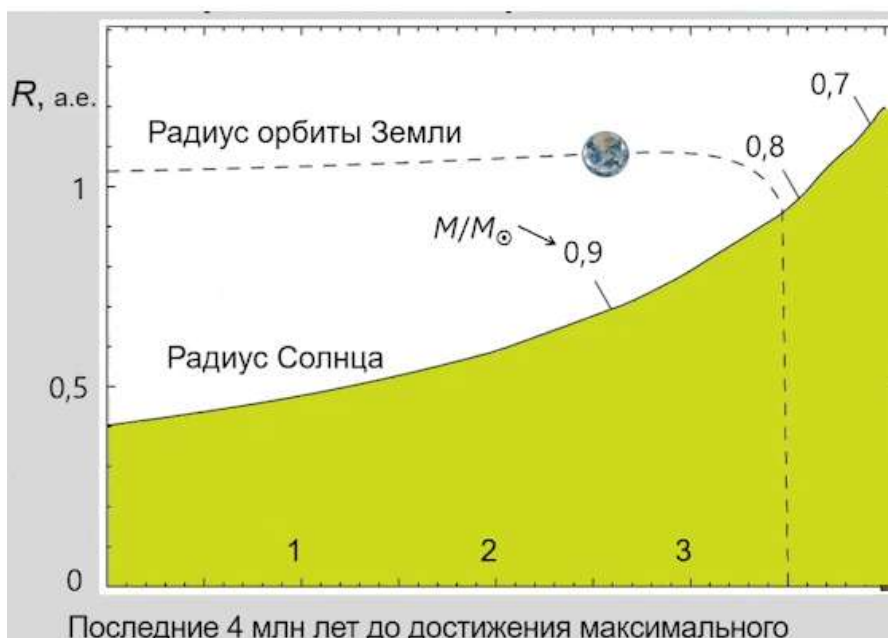


Рис. 32.5. Финал эволюции

В далеком будущем землянам необходимо думать, на какую планету переселяться. В максимум своей светимости Солнце нагреет большинство планет до катастрофически высоких температур. В этом случае, останется только Плутон. В настоящее время Плутон – это маленькая планета, но, когда Солнце станет красным гигантом, оно нагреет Плутон до 20 градусов.

Солнце закончит свою эволюцию сбросив верхние слои вещества (рис. 32.6).

На изображениях 32.7, 32.8 показана условная эволюция Солнца от вхождения в стадию красного гиганта до перехода в стадию белого карлика. Температура на поверхности планет станет равной 0.



Рис. 32.6. Солнце на стадии планетарной туманности

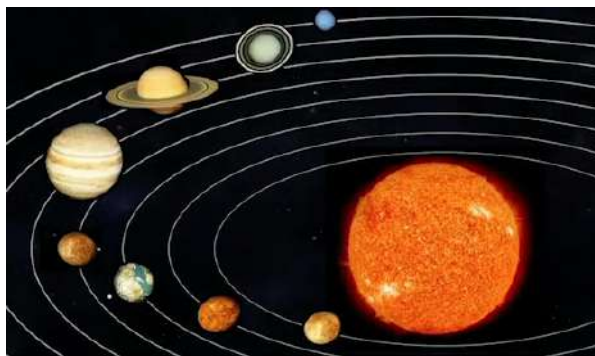


Рис. 32.7. Солнце входит в стадию красного гиганта

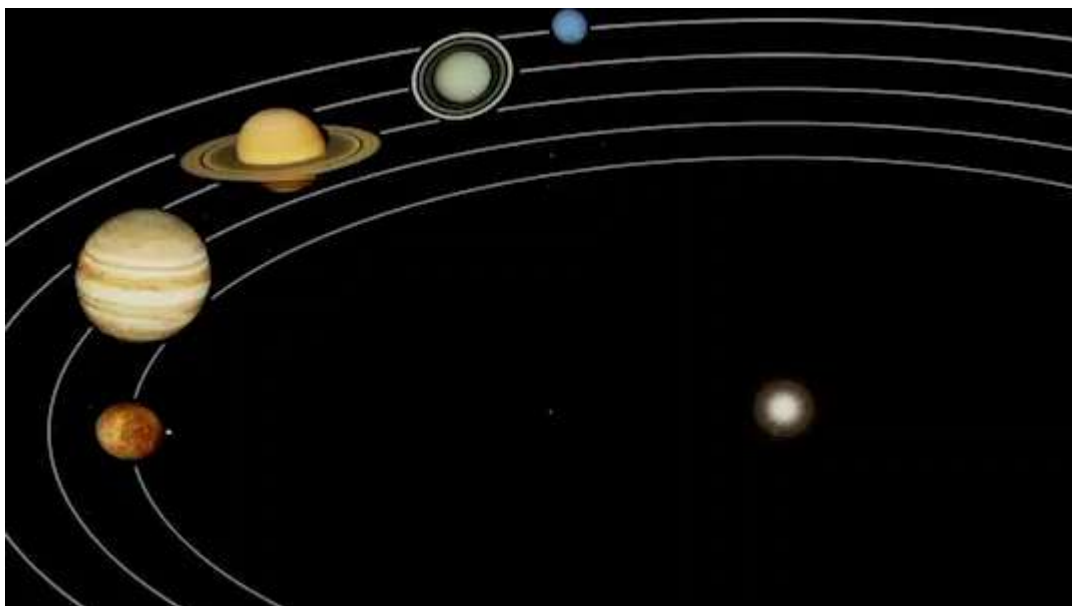


Рис. 32.8. Солнце на стадии белого карлика

В настоящее время ученые могут спрогнозировать неизбежные факторы, но существуют и случайные.

Случайные факторы

Падение космических объектов.

Время от времени на Землю падают космические тела. От падения больших тел на поверхности нашей планеты остаются крупные кратеры (рис. 32.10).



Рис. 32.9. Падение астероидов



Рис. 32.10. Аризонский кратер
диаметром 1.2 км

Такие события уже происходили: 1908 г. – падение Тунгусского метеорита (рис. 32.11).



Рис. 32.11. Тунгусская катастрофа
1908 года



Рис. 32.12. Иллюстрация художника –
падение крупного объекта на Землю

Небольшие объекты падают на Землю раз в несколько тысячелетий. Мелкие объекты падают на Землю чаще. Тело размером в 1 км может привести к глобальной катастрофе, а тело более 10 км приведет к концу Мира.

Таблица 32.1. Падение крупного астероида

Диаметр	Частота падения (раз в ... лет)	Последствия
100 м	5 000	Областная катастрофа
1 км	600 000	Глобальная катастрофа
10 км	100 млн	Конец цивилизации

Солнце

Солнце – спокойная звезда, но периодически на ней случаются вспышки. Земля очень чувствительна к этим изменениям.

Гибель звезды

Гибель быстро вращающейся массивной звезды сразу после коллапса её ядра может привести к тому, что вдоль оси вращения вырвется релятивистский джет и бьет по Земле.

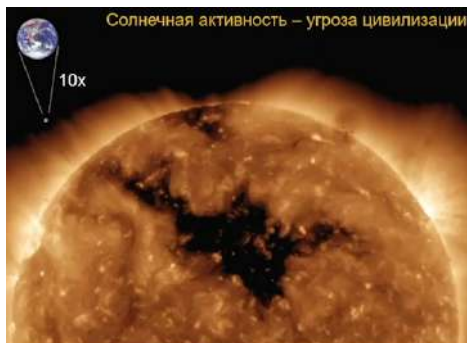


Рис. 32.13. Вспышки Солнца

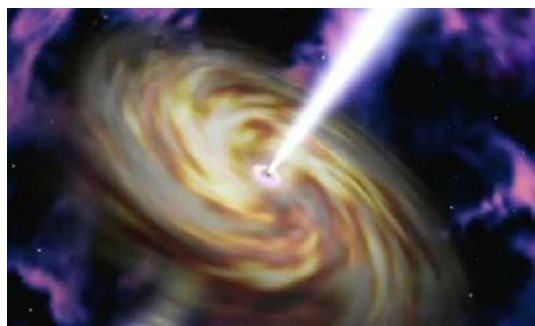


Рис. 32.14. Близкий взрыв массивной звезды

32.2. Ускоренное расширение Вселенной. Тёмная энергия

В течение 14 млрд лет, родившись из очень плотного состояния наш мир непрерывно расширяется.

В конце 20 века астрономы убедились, что кроме взаимной гравитации есть еще один неизвестный фактор, который играет роль антигравитации, т.е. взаимного расталкивания галактик и скопления галактик друг от друга.

Явление антигравитации астрономы заметили, измеряя расстояние до очень далеких галактик. Индикатором служит вспышка сверхновой звезды: по яркости сверхновой звезды можно судить о том, насколько далеко она находится. Скорости галактик довольно легко измеряются по смещению линии в спектре.



Рис. 32.15. Моделирование расширения Вселенной



Рис. 32.16. Вспышка сверхновой звезды

Со временем, мир постепенно будет тормозить свое расширение – в 1998 году выяснилось, что это не так. Новые факты и наблюдения подтверждают этот факт. В

нашу эпоху и в далеком будущем будет продолжаться ускоренное расширение Вселенной, антигравитация победила нормальное притяжение.

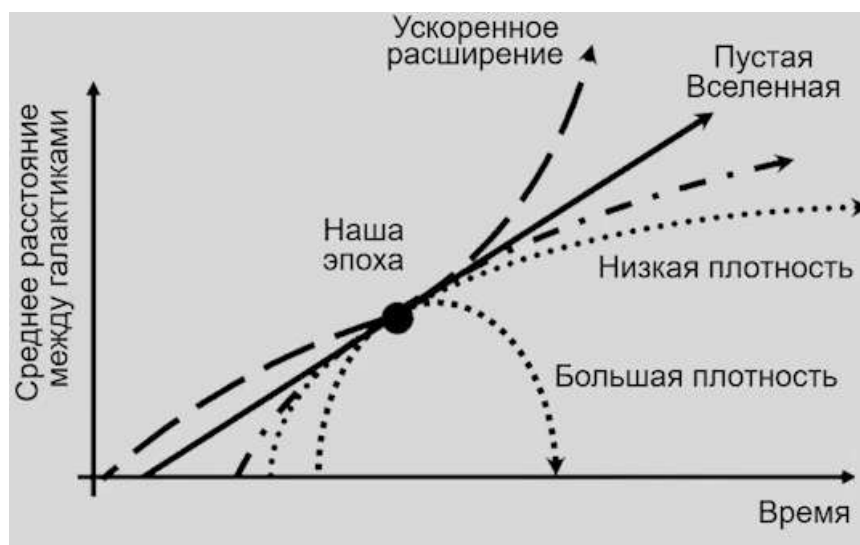


Рис. 32.17. Расширение Вселенной

На рисунке 32.18 показана условная картина прошлого нашей Вселенной. На графике продемонстрировано, как менялось соотношение между обычным веществом и темным веществом.

Антигравитация имеет свойство: чем дальше объекты находятся друг от друга, тем сильнее они отталкиваются.

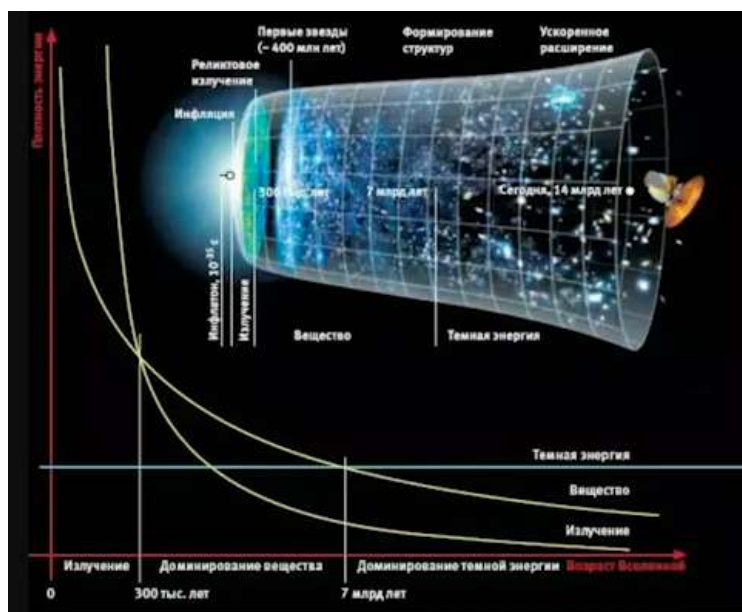


Рис. 32.18. Эволюция Вселенной

Состав Вселенной.

Таким образом, современное представление о Вселенной выглядит так: около 70% энергии принадлежит темной энергии. Термин «темная» употребляется в значении

«неизведанная». Около 27% нашего мира – это нормальное вещество, обладающее гравитацией, но природу которого пока не удалось выяснить. Только 5 % нашего мира принадлежат обычному веществу.



Рис. 32.18. Состав Вселенной по плотности энергии

Под действием расталкивающей силы расширение происходит ускоренно.

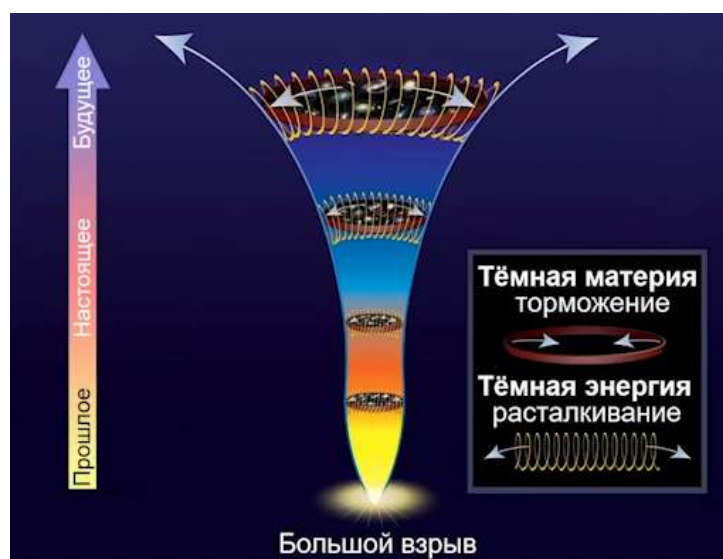


Рис. 32.19. Борьба гравитацией с темной энергией

Светлое будущее астрономии и физики

Современная наука о Вселенной, т. е. астрономия и физика, подобна айсбергу, большая часть которого скрыта пока от нас и обещает много неожиданных и захватывающих открытий.

Будущее Вселенной сегодня выглядит, как показано на графике (рис. 32.20): маловероятно, что наш мир когда-либо сожмется и весьма вероятно, что он будет

расширяться и это расширение продолжится. Будет ли это расширение ускоренным или оно постепенно перестанет ускоряться – это пока неизвестно.

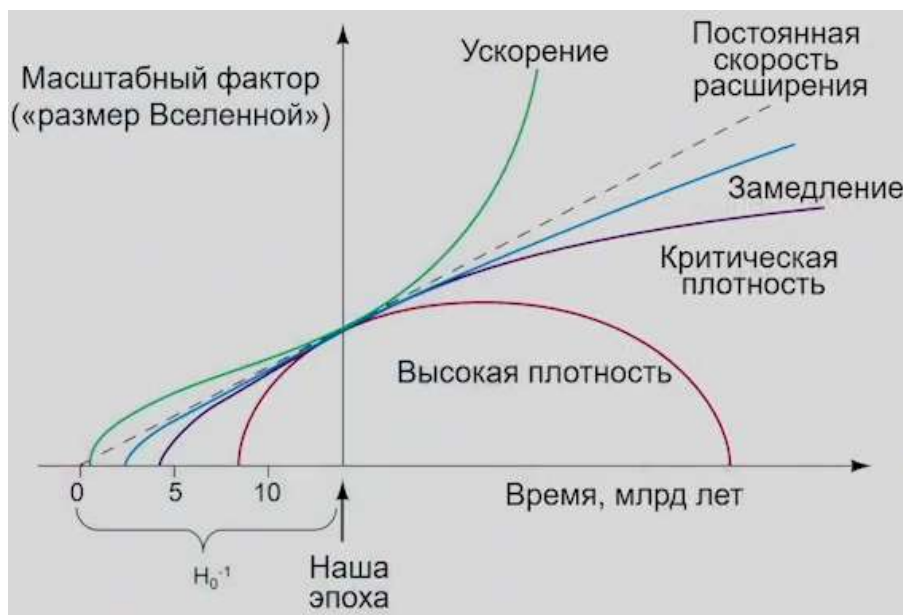


Рис. 32.20. Будущее Вселенной

Самое далекое будущее представляется физикам не очень оптимистично. Физики предполагают, что элементарные частицы, даже надежные как протон – не вечны.

Фрактальная Вселенная

Гипотеза заключается в том, что существует множество областей – Вселенных, которые родились и расширяются. Об этом говорит *теория инфляции*.

Теория инфляции – это рождение и быстрое расширение областей пространства – локальных Вселенных.

«Через миллиарды миллиардов лет наш вакуум распадется, и наша часть Вселенной станет десятимерной или сколлапсирует. Но благодаря самовосстановлению Вселенной весь мир в целом будет жить вечно!» Андрей Линде

Литература

Рекомендации:

- *Астрономические задачи с решениями.* Автор: В.Г. Сурдин
- *Вселенная озадачивает.* Автор: В.Г. Сурдин
- *Вселенная в вопросах и ответах.* Автор: В.Г. Сурдин
- *Астрономические олимпиады.* Автор: В.Г. Сурдин



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ