



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# ОБЩАЯ АСТРОНОМИЯ. ЧАСТЬ 2

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 ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ  
**СМОЛЬСКУЮ ДИАНУ ВЛАДИМИРОВНУ**



## Оглавление

<b>Лекция 1. Солнечная система.....</b>	<b>5</b>
Объекты Солнечной системы и методы их изучения .....	5
Полёты к планетам и малым телам Солнечной системы .....	13
<b>Лекция 2. Общие свойства Солнечной системы.....</b>	<b>24</b>
Параметры планет и их спутников .....	24
Астероиды .....	32
Процессы, влияющие на планеты .....	34
<b>Лекция 3. Планеты. Поверхность и атмосфера.....</b>	<b>37</b>
Поверхности тел Солнечной системы .....	37
Объекты и явления в атмосфере Земли .....	45
Внешний вид и строение атмосферы космических тел .....	51
Атмосфера и поверхность других планет .....	55
<b>Лекция 4. Строение и эволюция планет.....</b>	<b>61</b>
Внутреннее строение планет .....	61
Эволюция Солнечной системы .....	73
<b>Лекция 5. Планеты иных звёзд.....</b>	<b>78</b>
История открытия экзопланет .....	78
Современные методы открытия и изучения экзопланет .....	86
<b>Лекция 6. Звёзды .....</b>	<b>97</b>
Наблюдение, обозначение, каталоги звёзд .....	97
Изучение свойств звёзд.....	101
Двойные звёзды .....	107
<b>Лекция 7. Природа и эволюция звёзд.....</b>	<b>116</b>
Спектры звёзд .....	116
Связь спектра и массы звезды .....	132
Межзвёздные молекулярные облака и рождение звёзд.....	141
<b>Лекция 8. Источники энергии и эволюция звёзд.....</b>	<b>144</b>
Формирование звёзд.....	144
Источники энергии звёзд.....	153
Жизнь и конечный этап эволюции звёзд.....	167
<b>Лекция 9. Переменные звёзды.....</b>	<b>177</b>

Причины переменности звёзд .....	177
Переменность в системах двойных звёзд.....	186
Релятивистские звёзды.....	190
<b>Лекция 10. Галактики .....</b>	<b>205</b>
Млечный Путь .....	205
Спиральные галактики .....	213
Вращение галактик.....	219
<b>Лекция 11. Морфология галактик.....</b>	<b>232</b>
Наблюдения галактик.....	232
Классификации галактик .....	237
Динамика галактик .....	247
<b>Лекция 12. Крупномасштабная структура галактик.....</b>	<b>255</b>
Группы и скопления галактик .....	255
Скопления и сверхскопления галактик .....	265
Расстояния и движение галактик .....	267
<b>Лекция 13. Космология .....</b>	<b>275</b>
Структура Вселенной.....	275
Изучение начальных этапов расширения Вселенной .....	279
Варианты расширения Вселенной .....	293
Теория инфляции.....	297

## Лекция 1. Солнечная система

### Объекты Солнечной системы и методы их изучения

На рис. 1.1а в одном масштабе показаны все объекты Солнечной системы – более 1 млн. Можно увидеть глазом Солнце, планеты-гиганты, планеты типа Земли до Меркурия. Остальные объекты размером меньше 1 пикселя.

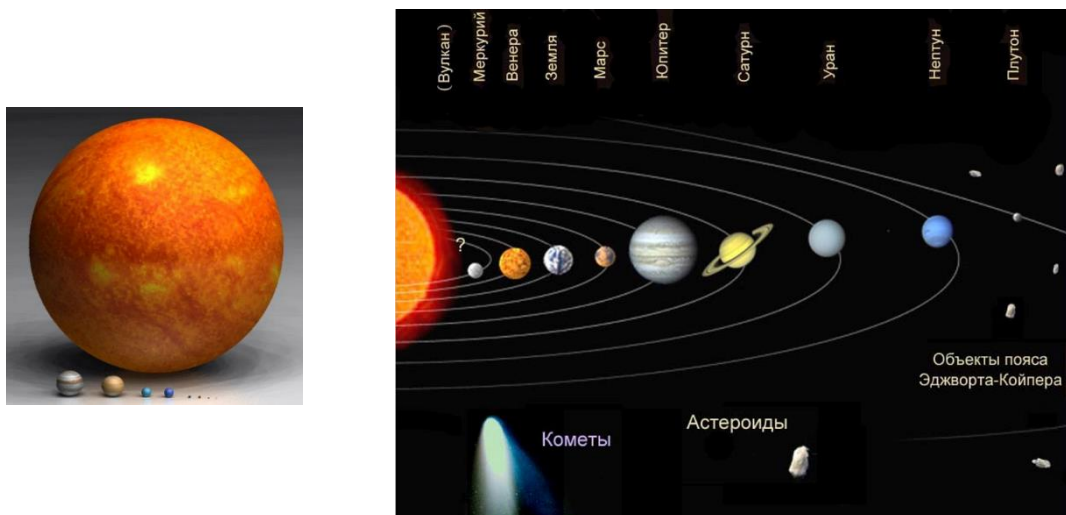


Рис. 1.1. Объекты Солнечной системы в одном масштабе (а) и их названия (б)

**Солнце** – важный объект, т. к. от него не только поток излучения, но и гравитация гораздо больше, чем от любой другой планеты. Возьмём рефлектор и направим весь поток солнечного тепла и света направим на Землю. Тогда все океаны выкипят за 4 минуты. Чтобы пары воды улетели с поверхности Земли, молекулы должны разогнаться до второй космической скорости. Это соответствует температуре 15 тыс. градусов. А за 1,5 недели вся Земля дезинтегрирует на элементарные частицы.

В Солнечной системе **8 больших планет** («классические планеты»), **малые тела** (кометы, астероиды), и **планеты-карлики** (рис. 1.1б).

Между Солнцем и Меркурием стоит знак вопроса. Мы до сих пор не уверены, что знаем весь состав Солнечной системы. Внутри орбиты Меркурия и за пределами орбиты Нептуна очень сложно работать (Солнце мешает или не даёт достаточно света).

А где **граница Солнечной системы**? Есть разные определения. Например, Солнце держит вокруг себя объекты, то есть область гравитационного контроля. Она простирается дальше, чем показано на рисунке.

Другое определение – вещество Солнечной системы и вещество не Солнечной системы, прилетающее к нам из межзвёздного пространства. Это расстояние меньше, примерно на 100 а. е. некоторые зонды встретили ударную волну (волну сжатия), где чужой ионизованный газ встречается с солнечным (рис. 1.2а). Если преодолеть эту область, там ещё будут тела, вращающиеся вокруг Солнца, но туда уже залетает частично чужое вещество. Внутри оно тоже залетает, но не так активно. Речь идёт

именно про ионизованный газ. Нейтральные атомы (например, атомы гелия) спокойно пролетают через Солнечную систему. А заряженные наталкиваются на солнечный ветер, потому что он несёт магнитное поле, а в магнитном поле заряженные части начинают навиваться на силовые линии.

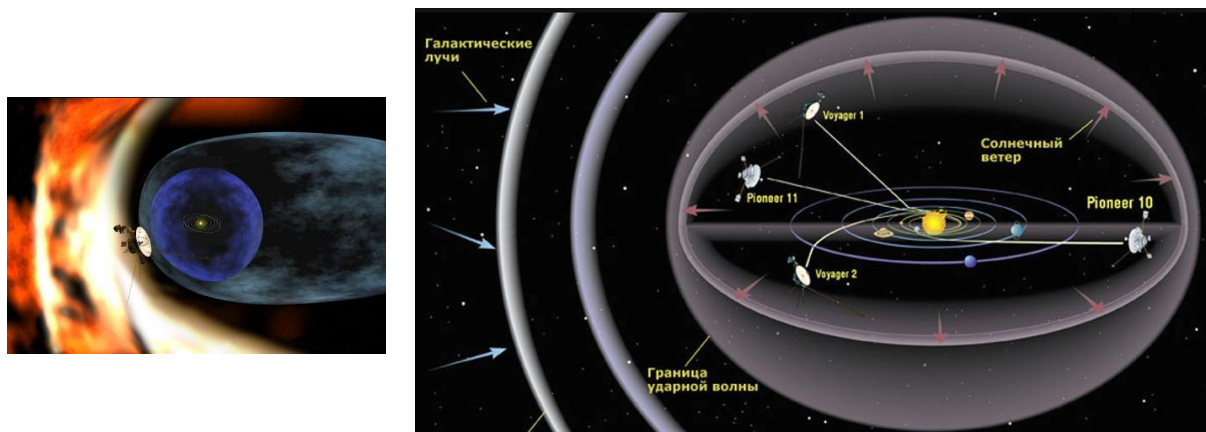


Рис. 1.2. а) граница Солнечной системы, б) большая Солнечная система

Рис. 1.2б – довольно старая картинка. Ещё с середины 80-х гг. границы достигли 4 зонда (2 «Пионера», 2 «Вояджера»), сейчас к ней приближается пятый (новый горизонт).

На рис. 1.3а показано, как **схематически** выглядит **Солнечная система**. Шкала логарифмическая. Примерно до 30 а. е. идёт область больших планет, а дальше области, о которых мы постепенно узнаём.

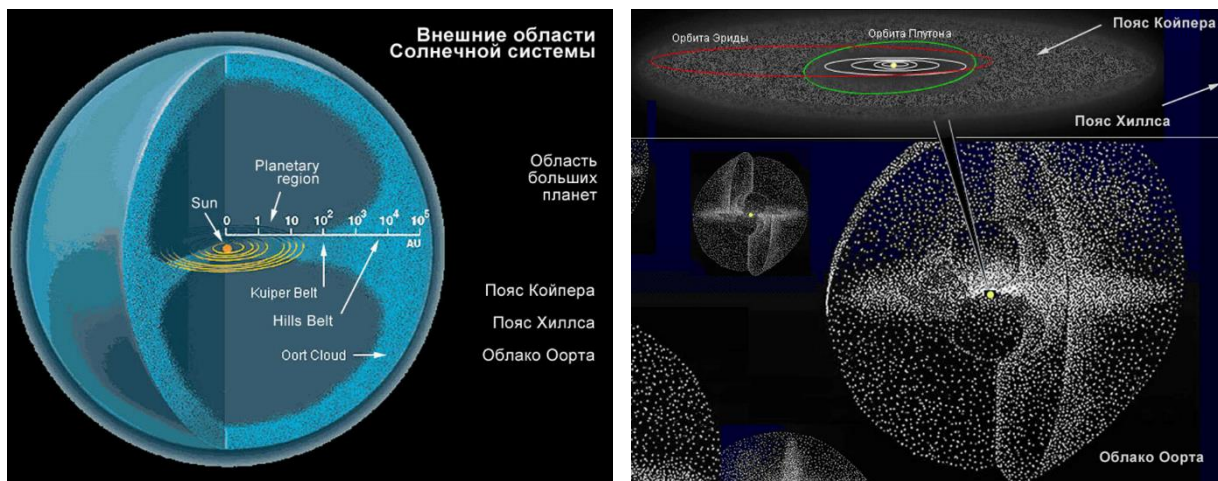


Рис. 1.3. а) внешние области Солнечной системы, б) проникновение облаков Оорта друг через друга

Например, **пояс Койпера** уже насчитывает 1000 объектов, в **пояс Хиллса** мы почти не проникли, туда залетают только отдельные объекты с вытянутыми орбитами, а в облаке Оорта не видим вообще ничего, хотя подразумевается, что именно там миллиарды мелких тел. Но расстояние 100 а. е., солнечный свет там ослабляется на 10

порядков по сравнению с тем, сколько мы получаем на Земле. Если объекты, расположенные там, сами излучают что-то, мы их увидим, но в отражённом солнечном свете ни один телескоп не сможет это сделать.

У соседних звёзд наверняка есть такие же **облака Оорта**. Звёзды движутся хаотически, иногда проходят недалеко друг от друга. Одно облако проникает сквозь другое (рис. 1.3б). Это очень редко приводит к прямым столкновениям, т. к. разреженность колоссальная. Но гравитация одной звезды, проходящей через облако Оорта соседней, может вызвать возмущения в движении объектов. Одни будут выброшены, а другие отправятся к центру звёздной системы. Это бывает время от времени, получается избыточный поток тел.

Иногда добираются даже **чужие объекты**. Впервые мы увидели объект, прилетевший из-за пределов Солнечной системы, в 2017 г., когда влетел **астероид** (предполагаемо) **Oumuamua**, изображённый на рис. 1.4а. Его название означает «первый вестник издалека» на языке аборигенов Гавайских островов, где стоит телескоп, открывший этот объект. Он приближался со стороны Солнца и его было сложно рассмотреть, пока он не пролетел мимо Земли (рис. 1.4б). Известны его относительные размеры (длина к ширине). Среди миллионов астероидов, обнаруженных в Солнечной системе, ни одного такого сигарообразного нет.

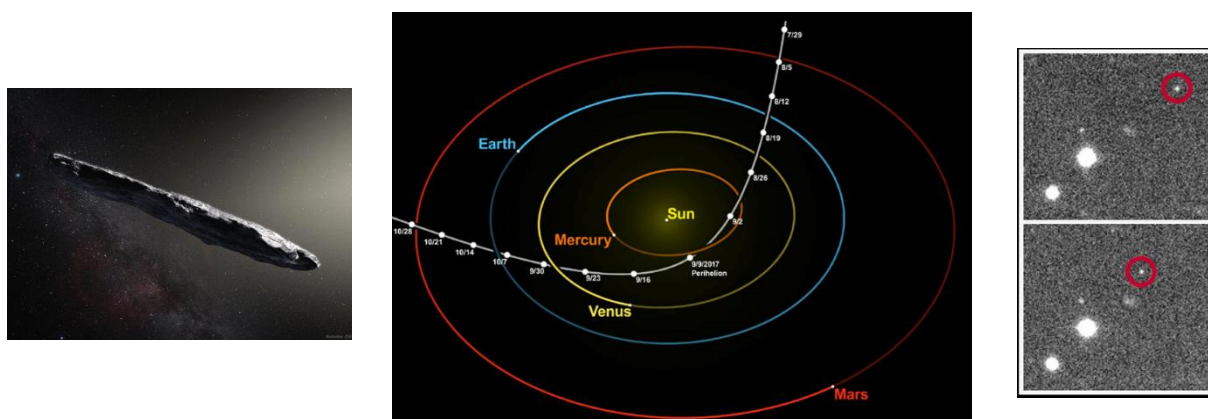


Рис. 1.4. (а) первый межзвёздный объект Оумиамуа, (б) его траектория пролёта через Солнечную систему, в) движение объекта на фоне звёзд

В нынешние времена автоматические телескопы позволяют очень быстро открывать **новые объекты**. Обычно на фоне неподвижных звёзд мы видим их как сдвигающиеся, «прыгающие» точки (рис. 1.4в). Раз они быстро перемещаются, значит, расположены близко и принадлежат Солнечной системе. Если наблюдать за таким объектом хотя бы одну ночь, можно вычислить его траекторию.

**Статистика** уже давно идёт линейным образом и в прошлом году уже превысила миллион объектов (рис. 1.5а). Излом в 2000 г. связан с тем, что астрономы перешли от ручного поиска к автоматическому. Телескоп сам собирает информацию, компьютер её анализирует и утром выдаёт результаты.

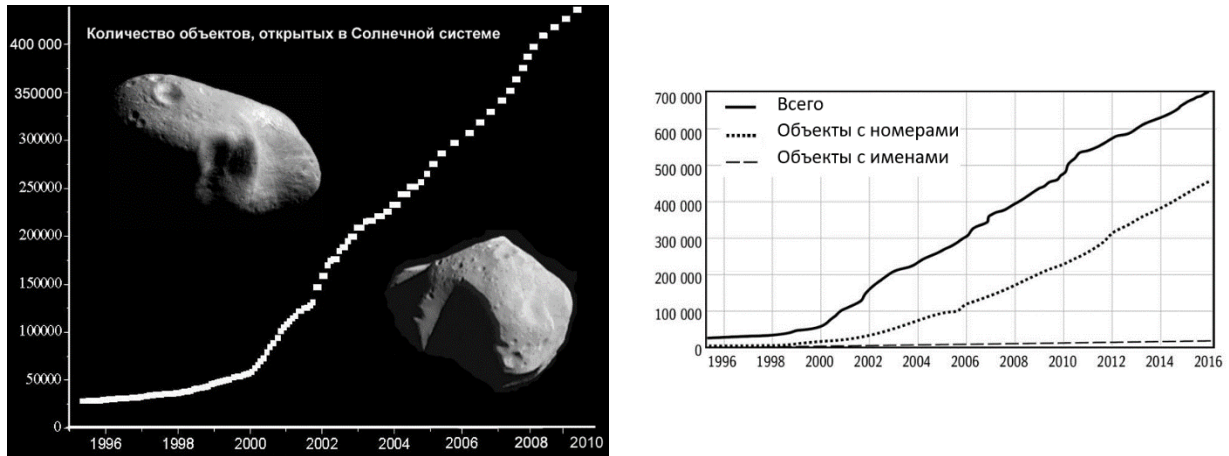


Рис. 1.5. а) количество объектов, открытых в Солнечной системе, б) их разделение на группы

На рис. 1.5б приведена та же статистика и ещё 2 кривых. Это **количество обнаруженных астероидов** (сотни тысяч) и **комет** (несколько тысяч). Мы находим объект, дальше надо проследить заметную часть его орбиты, чтобы точно найти её параметры и уже его не потерять и иметь возможно рассчитать, где он был 100 лет назад или где будет через 100 лет. Точечный пунктир – именно такие астероиды. Они уже занесены в каталог со своими именами. А нижний пунктир – астероиды, получившие имена в честь известных людей.

**Спутники планет** тоже нелегко открывать. В 1980 г. было известно 45 спутников, в основном у Юпитера и Сатурна (рис. 1.6а). А в 2022 г. уже известно 212 спутников.

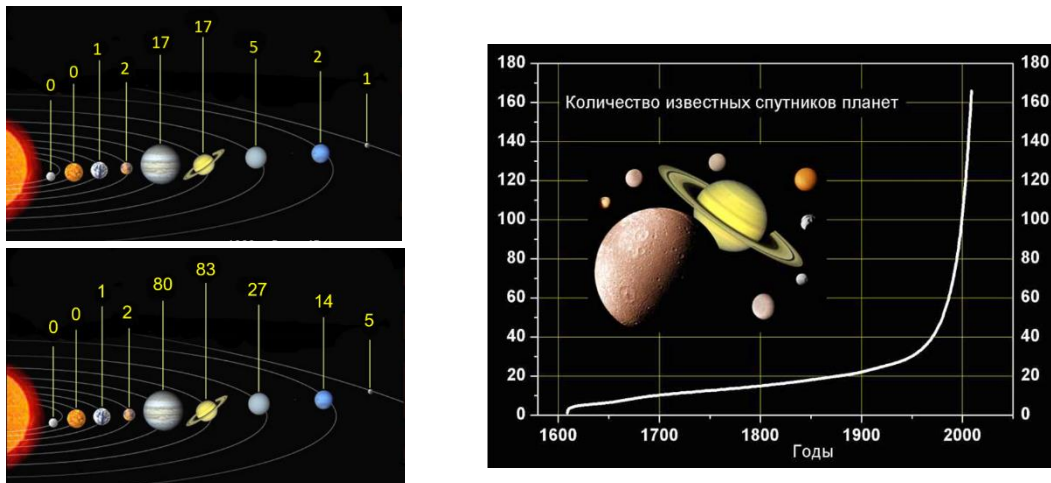


Рис. 1.6. а) спутники планет, открытые до 1980 г. (45) и до 2022 г. (212), б) количество известных спутниковых планет

Новые спутники всё сложнее открывать, потому что они маленькие. У Сатурна известны спутники размером 1–2 километра. А область вокруг планеты, где они могут быть, большая, и чем дальше планета, тем больше её область гравитационного контроля.



На рис. 1.6б видно, что статистика обнаружения спутников резко пошла вверх в нашу эпоху, т. к. работает автоматика, ПЗС-матрицы.

На рис. 1.7а показан один из **автоматических телескопов** – система **МАСТЕР**, которая поддерживается в ГАИШ. В мире есть более крупные телескопы, но наш с ними успешно конкурирует, т. к. они разбросаны далеко по долготе от Дальнего Востока до Южной Америки.

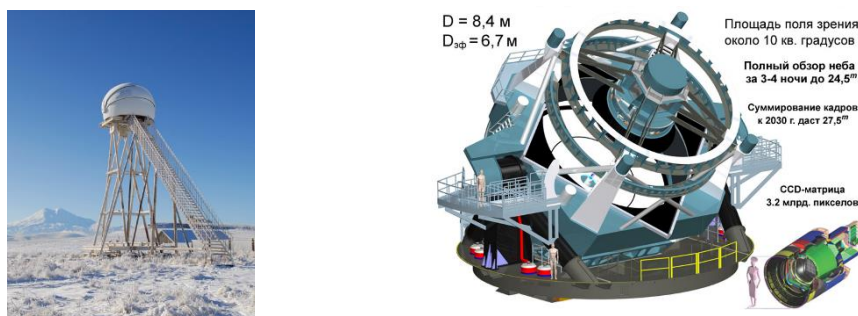


Рис. 1.7. а) сеть робот-телескопов МАСТЕР, б) LSST – Large Synoptic Survey Telescope

Но нужны телескопы более крупные, с большим диаметром объектива и в то же время – с большим полем зрения, чтобы каждую секунду контролировать всё небо. Сейчас строится **телескоп LSST** (рис. 1.7б) с огромным для такого диаметра полем зрения и камерой на 3 Гп. Таких телескопов будет минимум два: в северном и южном полушариях.

Картинками вроде 1.8а лучше не пользоваться. Здесь в ячейках одинакового размера звезда, планеты-гиганты, планеты земного типа, спутники и даже астероиды.

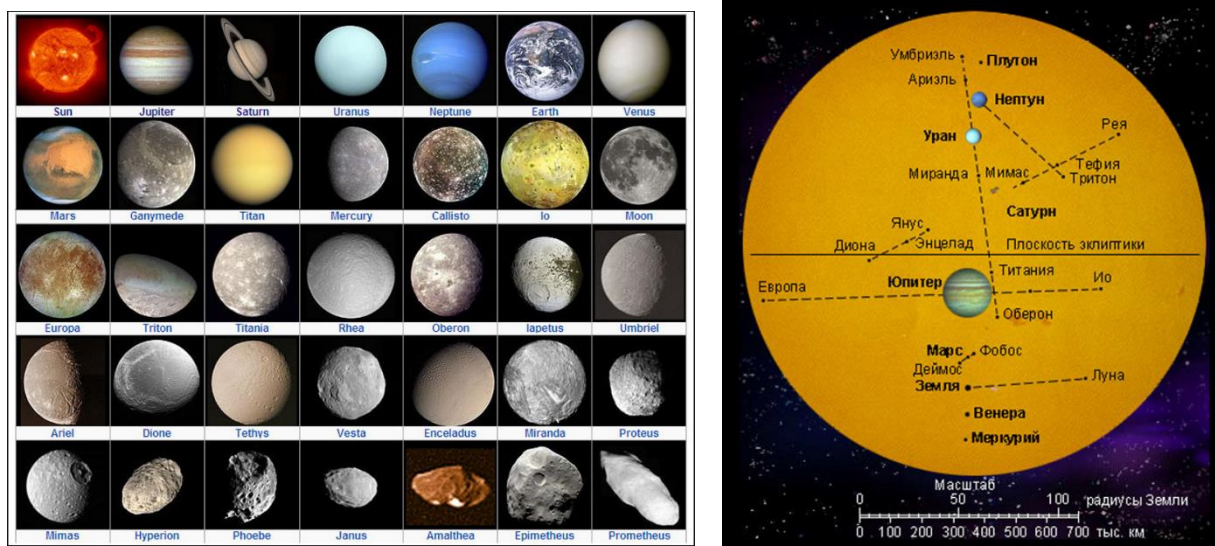


Рис. 1.8. а) космические объекты в ячейках одного размера, б) объекты Солнечной системы в масштабе

Лучше показано на рис. 1.8б, где **в одном масштабе** планеты, Солнце и спутниковые системы.

Все 8 планет можно разделить пополам (рис. 1.9). Получаются 4 планеты-гиганта и 4 планеты земного типа. Гиганты тоже можно разделить пополам: 2 газовых, где основной объём занимают водород и гелий, и 2 ледяных. Льдами в астрономии называют легко замерзающие соединения. Там есть водород и гелий, но ещё пары воды, метана, аммиак. Планеты земной группы тоже делим на 2 группы: Земля и Венера почти не отличимы по массе и по размеру, Марс и Меркурий не очень похожи, но обе планеты лишены атмосферы.

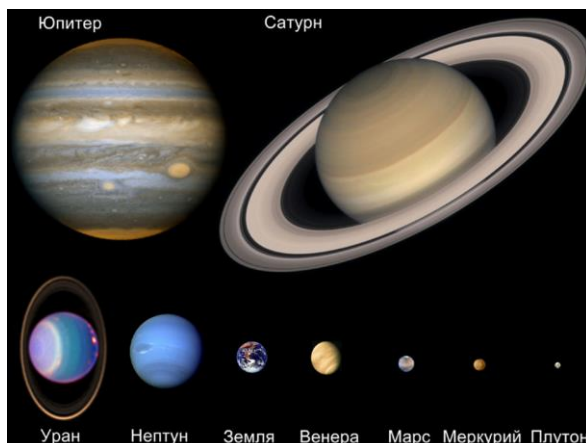


Рис. 1.9. Разделение планет Солнечной системы на группы

О внутреннем строении планет мы знаем очень мало. Это касается и Земли. У Земли есть железное ядро, мантия и кора, но если посмотреть современные обзоры, температура в центре Земли указана от 5000 до 6000 К.

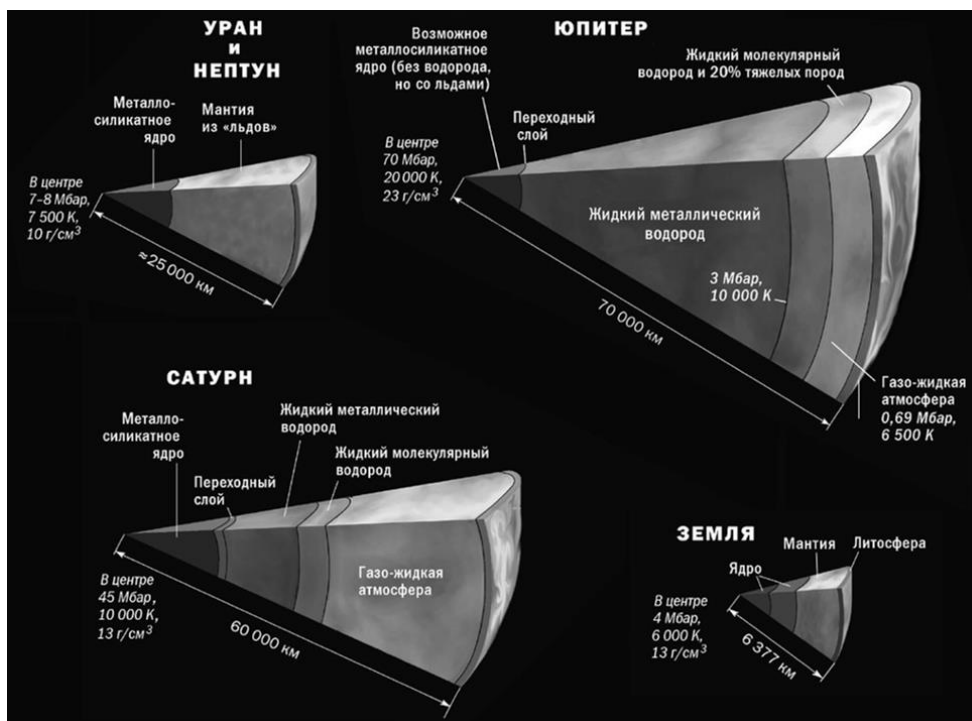


Рис. 1.10. Внутреннее строение планет Солнечной системы

Мы знаем массы планет-гигантов, объём, можем посчитать среднюю плотность, а дальше подгоняем теоретические модели под эти внешние параметры (рис. 1.10). Хорошо, если удаётся измерить гармоника гравитационного поля. Все планеты сжаты вдоль оси вращения, а сжатие зависит от того, как внутри распределена плотность. Чем более плотность концентрирована к центру, тем меньше сжатие при той же скорости вращения. Здесь теоретический разброс уже очень сильный.

О происхождении Солнечной системы мы знаем очень мало. На картинке 1.11 показан **наклон осей вращения планет** по отношению к их плоскости эклиптики (орбитальной плоскости).

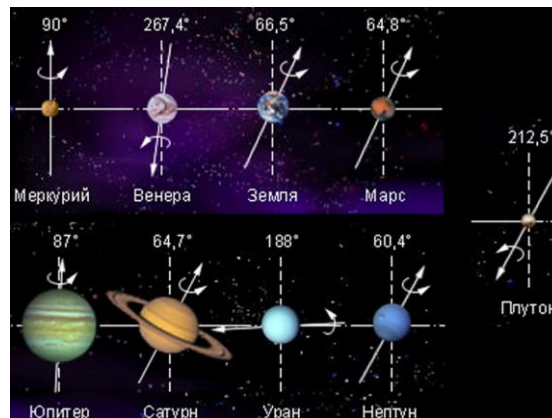


Рис. 1.11. Наклон осей вращения планет по отношению к их орбитальным плоскостям

Непонятно, как такая система могла сложиться. Венера очень похожа на Землю, но вращается в обратную сторону со скоростью в 200 раз меньше. Сатурн вращается почти с тем же периодом, как Земля (отличие в 2 раза), и с тем же наклоном, но между ними мало общего.

Наблюдаем мы в основном с Земли и изредка из космоса. На Земле наблюдениям мешает атмосфера. Обычно мы ориентируемся на **угловое разрешение** в 1 секунду. Но это бывает только в хороших обсерваториях (там оно может достигать и 0,5 секунды). В линейных мерах 1 секунда на Луне – 2 км. Более мелкого мы там не увидим. На Марсе 1 секунда – 270 км, на Юпитере – 3000 км, а на Плуtone 28 тыс. км. Но сам Юпитер в диаметре примерно 1,5 тыс. км, то есть на любой фотографии он меньше пикселя.

В Европе есть неплохие обсерватории. Самая лучшая до сих пор – **Пик-дю-Миди** (рис. 1.12а).

На рис. 1.12б показано, как росло **теоретическое разрешение** от момента изобретения телескопа до наших дней. Рост диаметра объектива и дифракция позволили бы им наблюдать и десятые, и сотые доли угловой секунды. А реально мы видим, что атмосфера всё портит. Пока телескопы жили на уровне Земли, было 3 угловых секунды. Потом стали подниматься: калифорнийские, гавайские обсерватории достигли 0,5 сек.

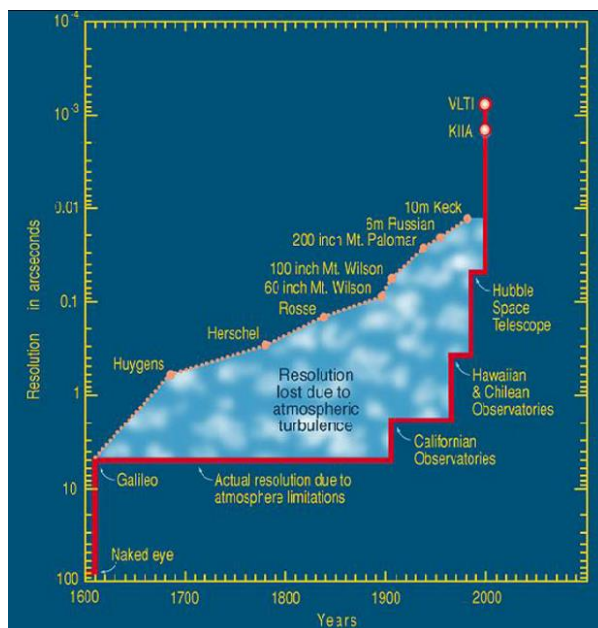
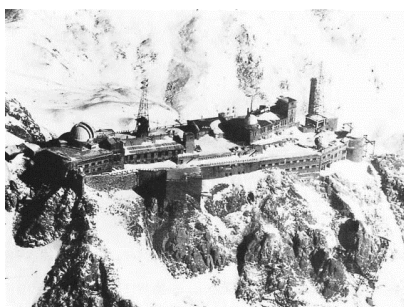


Рис. 1.12. (а) – обсерватория Пик-дю-Миди, (б) – рост разрешения телескопов

Дальше полетели в космос, но маленькие телескопы. На Земле остались большие, но с атмосферными помехами. И, наконец, наземные телескопы получили адаптивную оптику и систему интерферометрии, когда несколько телескопов наблюдают один объект, складывают свой свет. Это позволило дойти до тысячных долей угловой секунды. Такое разрешение имеют **VLT1** – телескопы размером 8,5 м, из четырёх таких телескопов составляют единый инструмент.

До недавних пор единственным космическим телескопом был «Хаббл», но у него зеркало всего 2,5 м. Сейчас ждём, чтобы «Джеймс Веб» вышел на стационарный режим. Космические телескопы дают возможность хорошо видеть поверхность планеты, детали в атмосфере и даже детали на спутнике. Чем ближе мы подлетаем, тем лучше качество картинки. Самые лучшие картинки с космического зонда (рис. 1.13а).

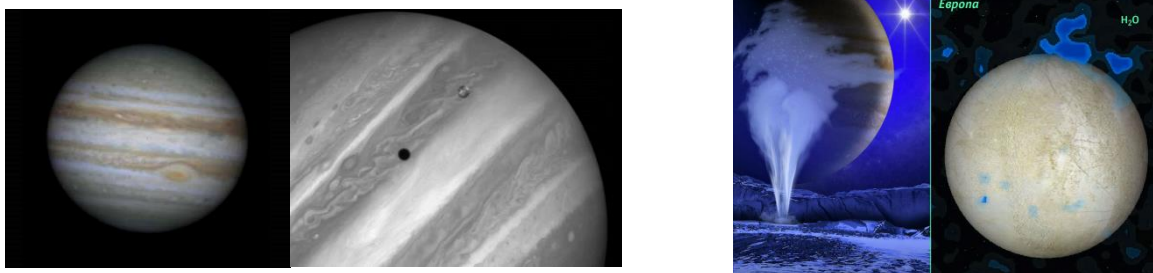


Рис. 1.13. а) сравнение снимков Юпитера, полученных земным и космическим телескопами, б) снимки спутника Юпитера Европы с Вояджера и Хаббла

Хорошо сочетать околоземные и космические методы изучения планет. Мы давно предчувствовали, что на спутнике Юпитера Европе могут быть водяные гейзеры. «Вояджер» получил детали, трещины с близкого расстояния, а «Хаббл» заметил выбросы воды (рис. 1.13б).

Астрономы-любители тоже вносят вклад в развитие науки. Г. Борисов два года назад открыл первую **межзвёздную комету**. На Юпитер 3 раза падали кометы, и если первый раз это заметили профессионалы, то второй и третий – любители. Это интересное явление, т. к. при падении кометы километровый айсберг несётся со скоростью 60 км/с, ударяет по атмосфере Юпитера и на какое-то время её раздвигает (облака испаряются от взрыва), позволяя заглянуть внутрь.

На рис. 1.14 представлены 3 картинки. Две левые – **лучшие любительская и профессиональная фотографии** конца 20 века. А справа показано, как сегодня любитель может сфотографировать **Сатурн**. Повышение качества связано с тем, что любитель, по сути, снимает кино. В течение нескольких секунд снимаются 4800 кадров, из них компьютерная программа выбирает ряд лучших, потом их складывает, контраст усиливается, и в результате видны детали облачности, которые раньше на профессиональном снимке разглядеть было нельзя.



Рис. 1.14. Лучшие снимки Сатурна доцифровой и цифровой эпох

## Полёты к планетам и малым телам Солнечной системы

Теперь поговорим о полётах в космос. Первый полёт к Луне был в 1959 г. – «Луна-2» (рис. 1.15а). До этого «Лунник-1» прошёл мимо Луны, а этот аппарат уже ударился об неё. В этом же году был самый интересный космический эксперимент в области исследования планет – «Луна-3». (рис. 1.15б). Она сделала **фотографию обратной стороны Луны**, которую никогда нельзя увидеть с Земли.



Рис. 1.15. (а) – Луна-2, (б) – Луна-3

Аппарат залетел за Луну. Это был первый в истории космонавтики **гравитационный манёвр**. Его рассчитали в институте прикладной математики. Гравитационное поле Луны позволило совершить манёвр, изображённый на рис. 1.16а, двигателей на борту не было, управлять было нельзя. Были сделаны фотографии на плёнку, там же на борту проявлены, закреплены химическими реактивами, негативы были отсканированы и по радио переданы на Землю.

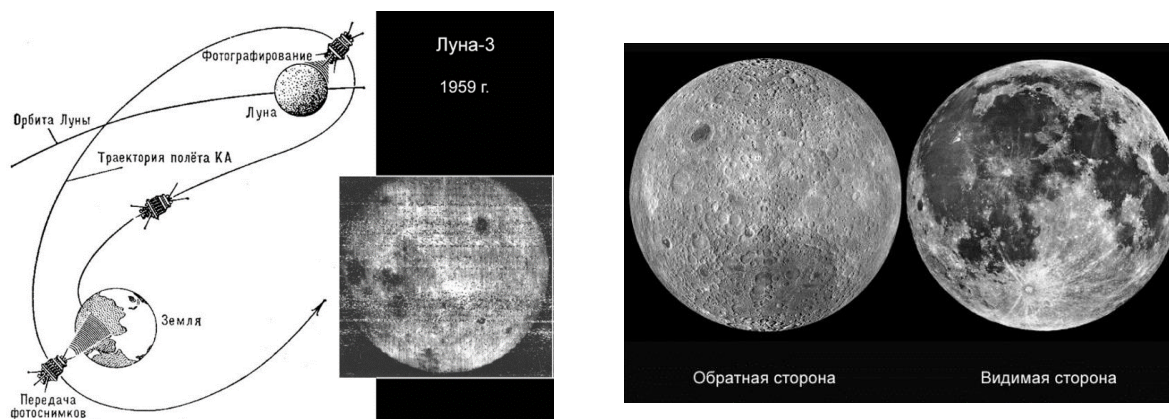


Рис. 1.16. (а) – гравитационный манёвр Луны-3, (б) – фотографии обратной и видимой сторон Луны

Главной неожиданностью стало то, что на видимой стороне Луны много **лавовых морей**, а на обратной их практически нет (рис. 1.16б).

Первый спутник Луны – «**Луна-10**». С его помощью были открыты **Масконы** – концентрации массы под поверхностью Луны. Оказалось, что у неё гравитационное поле очень неоднородное (рис. 1.17а).

На топографическом изображении синее в центре – большой метеоритный кратер, а когда над ним пролетает спутник, он над этим местом приближается к орбите, то есть в нём избыток гравитации. Более плотное вещество делает данную область областью повышенной концентрации массы. Это опасно, т. к. при посадке на Луну при пролёте над масконом аппарат может удариться о поверхность.

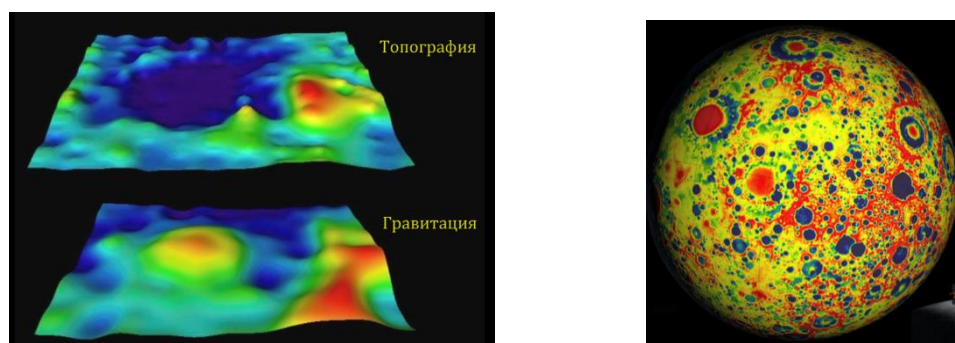


Рис. 1.17. Топографическая и гравитационная карты Луны

На рис. 1.17б продемонстрирована современная **гравитационная карта Луны**. Два спутника летали и измеряли взаимное расстояние микроволновым передатчиком. И

там, где градиент гравитационного поля, они смещались друг относительно друга, и таким образом была составлена детальная карта гравитации. Красные области – масконы, синие – области пониженной гравитации по сравнению со средней.

Первая посадка на чужое небесное тело – «Луна-9», за ней «Луна-13» в 1966 (рис. 1.18а). Промежуточные полёты были неудачные.

Автоматические самоходные аппараты (**луноходы**) тоже впервые появились в нашей стране (рис. 1.18б). Изначально они создавались как транспортное средство для космонавтов, а потом на них прикрепили приборы, например, гамма-детектор, который измерял плотность и минеральный состав грунта.

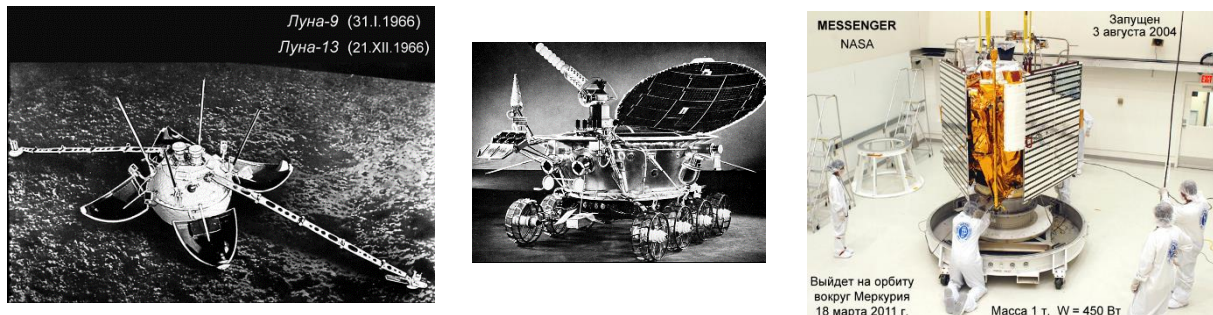


Рис. 1.18. (а) Луна-9 и Луна-13, (б) первый луноход, в) MESSENGER

Управляли этими машинами с Земли. Сигнал шёл с Луны секунду и столько же обратно, но даже с задержкой в 3 секунды аппарат иногда заезжал в кратеры, поэтому компьютер на борту лучше.

Дальше Луну исследовали люди. Они доставили 400 кг лунного грунта и много что измерили на Луне.

Луна и Меркурий очень похожи. Оба не имеют атмосферы. Про **Меркурий** мы знали очень мало, пока к нему не подлетел первый спутник. Один раз за всю историю космонавтики были пролёты мимо Меркурия – «Пионер-10», были составлены карты одного полушария. Потом появился спутник «MESSENGER» (рис. 1.18в). На сегодняшний день основные данные о Меркурии передал он.

Лунные **кратеры** глубже, и у них вал выше. Так получилось, потому что на Меркурии сила тяжести больше, после удара метеорита грунт выравнивается. Также на Луне нельзя увидеть наплывов – **эскарпов** (рис. 1.19а).

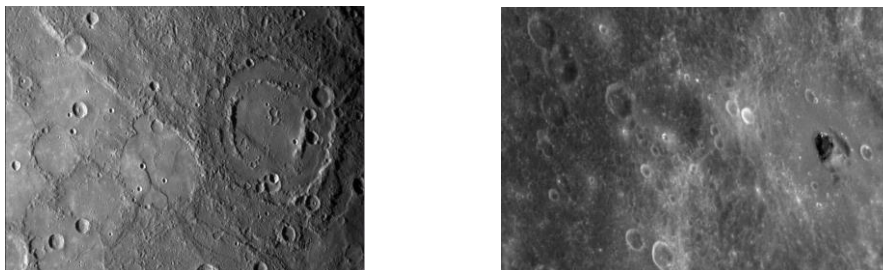


Рис. 1.19. Фотографии поверхности Меркурия

Это, скорее всего, связано с тем, что внутреннее строение у Меркурия другое. Луна каменная, у неё маленькое железное ядро, а у Меркурия половину объёма занимает железо и никель. Остывая по мере эволюции, железо сжимается, объём уменьшается, и гора начинает образовывать складки.

Ещё в некоторых кратерах Меркурия видны очень тёмные пятна (рис. 1.19б). Геологи говорят, что такой цвет может иметь только углеводородный состав – мазут, нефть и т. д.

На рис. 1.20а представлена самая удачная отечественная программа исследования планет. Марс мы исследовали не очень удачно, а **Венеру** – очень. К ней подлетали аппараты серии «Венера». В экспедиции «Вега» при пролёте около Венеры на неё был сброшен посадочный аппарат в капсуле, остальная часть полетела к ядру кометы Галлея и впервые в истории исследовала комету.

**Посадки на Венеру** проходили оригинально. Сначала на парашюте, а потом парашют сбрасывался на высоте примерно 30 км, и аппарат падал, но не разбивался, потому что в плотной атмосфере просто тормозил корпусом и опускался.

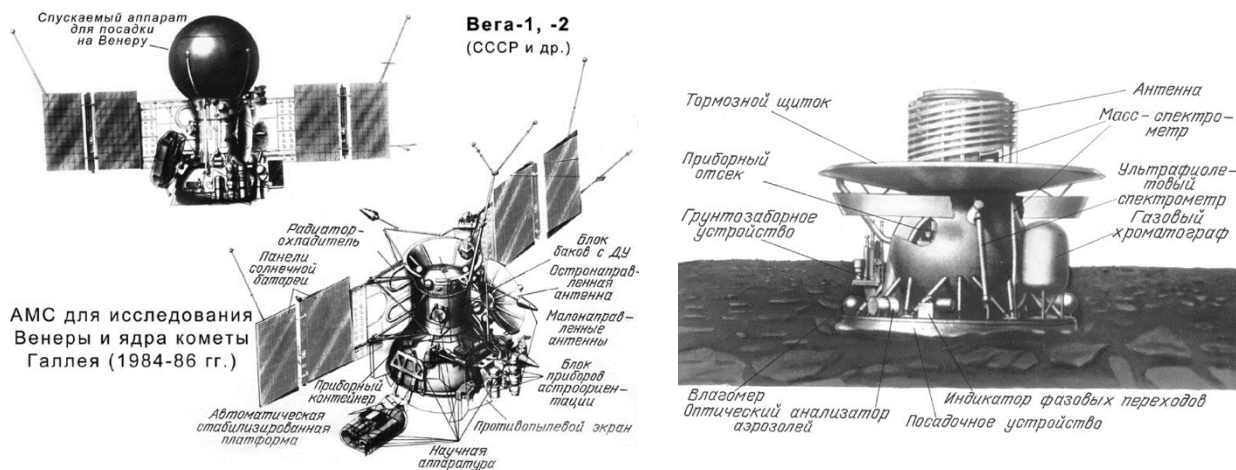


Рис. 1.20. (а) аппараты, исследовавшие Венеру, (б) аппарат на поверхности Венеры

В полётах «Вега-1» и «Вега-2» в какой-то момент из-под зонда выпускался аэростат, надувался и летал несколько суток на высоте нескольких километров над поверхностью. Он успевал за это время пролететь вокруг почти всей планеты и передать информацию с приборов по радиоканалам.

На поверхности Венеры нельзя работать долго, т. к. **атмосфера очень горячая** (460 °С), плотная, поэтому поток тепла колоссальный. Через час – полтора аппарат выходил из строя, но за это время успевал побурить, сделать пробу грунта, через специальный шлюз поместить внутрь, провести химический анализ (рис. 1.20б). А также передавать фотографии.

Камера поворачивалась на 180 градусов сначала к одному горизонту, потом под ноги посадочному аппарату, дальше к другому (рис. 1.21а). В наше время получилось



уменьшить контраст на **фотографиях поверхности**, и стало лучше видно детали (рис. 1.21б).

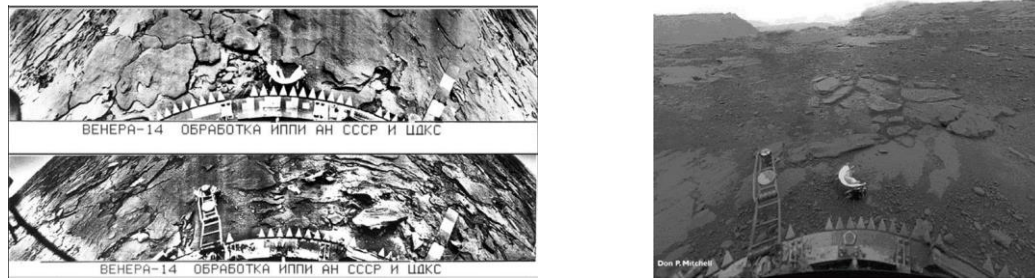


Рис. 1.21. Фотографии Венеры (а), в том числе уменьшенным контрастом (б)

Всю поверхность так исследовать нельзя, надо было составить **карты твёрдой поверхности** Венеры. Сквозь облака проходят только радиосигналы, и к поверхности Венеры послали 3 радиолокационных спутника, 2 советских и 1 американский. Теперь у нас есть радиолокационные карты Венеры (рис. 1.22а). Цветом показан уровень: голубое – низменности, зеленовато-жёлтое – возвышенности, красное и особенно белое – максимальные высоты. Самая большая горная система – горы Максвелла, – 11 км над средним уровнем планеты.

На Венере есть **кратеры**, причём только крупные (рис. 1.22б), потому что мелкие метеориты не могут пролететь через атмосферу: давление около поверхности Венеры 93-94 атмосферы, масса воздуха над поверхностью в 100 раз больше, чем на Земле.

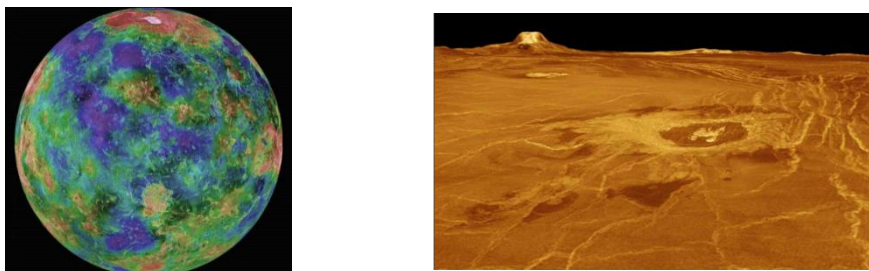


Рис. 1.22. (а) радиолокационная карта Венеры, (б) фотография поверхности Венеры, кратер

Толщина земной атмосферы, приведённая к плотности камня, 3 метра. Метеорит меньшего размера пробить нашу атмосферу не сможет. Размер кратера обычно примерно в 20 раз больше, чем размер метеорита.

Также на Венере есть **горы**, предположительно, вулканические. Видны потоки свежего вещества, возможно, вулканы (рис. 1.22б).

К **Марсу** (рис. 1.23а) было отправлено очень много аппаратов разных стран. У него очень интересная геология. **Разрывы поверхности** не пропилены водой, а именно трещины в верхней коре планеты (рис. 1.23б). Также на Марсе есть **следы воды**, но самой воды нет (рис. 1.23в).

Полёт на Марс – сложный процесс. До Луны космический аппарат летит 3 дня, а до Марса 6 – 8,5 месяцев.

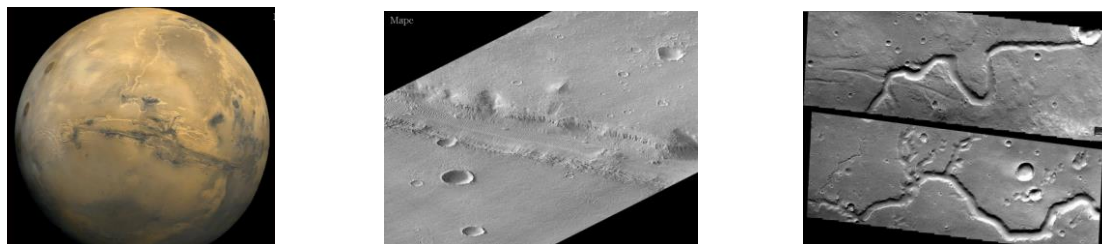


Рис. 1.23. (а) – разрывы поверхности Марса, (б) – трещины и (в) – следы воды на Марсе

На рис. 1.24 показано, какую дозу радиации человек получит за год. Доза измеряется в бэр (биологический эквивалент рентгена). Максимально допустимая безопасная доза в год 5 бэр. А при полёте на Марс и обратно человек за 3 года получит не менее 80 бэр.

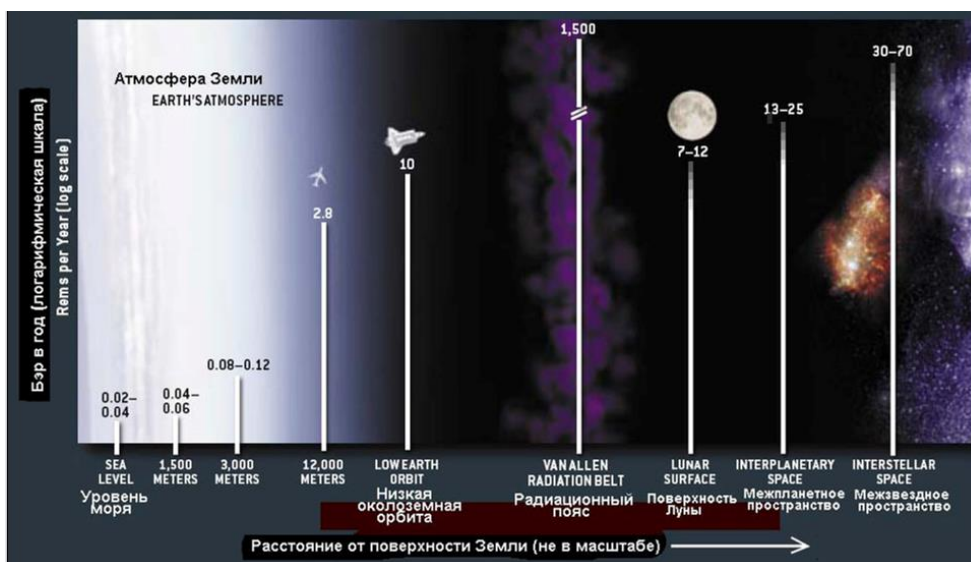


Рис. 1.24. Годовая доза излучения космонавта

Человека при полёте на Марс можно защитить. Надо создать эквивалент нашей атмосферы. Можно сделать 5 м воды вокруг космического корабля, но резервуар будет весить 500 тонн. Можно взять полиэтилен, в нём выше содержание водорода, резервуар не будет нужен, но масса всё равно составит 400 т. Ещё вариант – чистый водород: он лёгкий, но требуется массивный герметичный бак.

Лёгкие элементы более эффективно защищают от потока частиц. Космические лучи – почти чистые протоны, и ядра водорода протоны. Если сделать железную или свинцовую защиту, ядра будут тяжёлые, протоны будут отражаться от них, а энергию тратить не будут. А когда одна частица ударяет такую же другую, энергия делится пополам. После определённого числа соударений у налетающей частицы не остаётся энергии, она вся переходит в тепло.

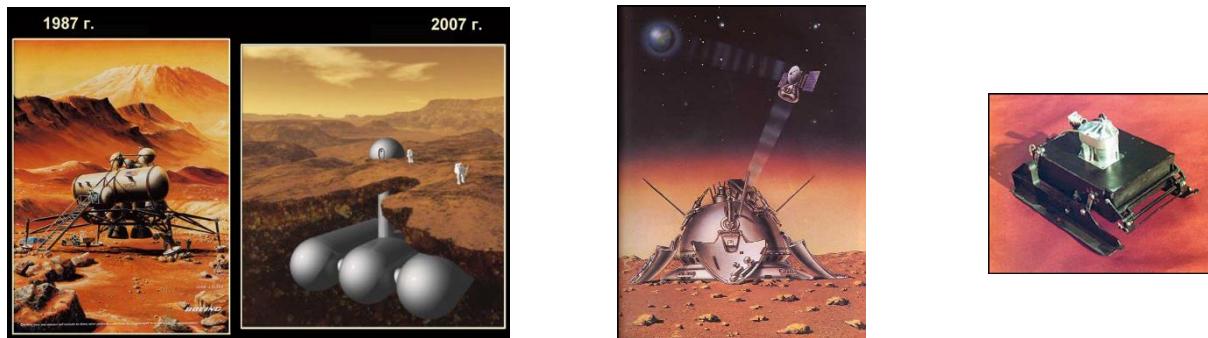


Рис. 1.25. а) проекты научной базы на Марсе в 1987 и 2007 гг., б) Марс-3, в) первый марсоход

А на поверхности Марса лучше жить под поверхностью и по радио управлять аппаратами (рис. 1.25а).

Первую посадку на Марс совершил советский аппарат «Марс-3» в 1971 г. (рис. 1.25б). На его борту был первый советский марсоход (рис. 1.25в). Его сбрасывала на поверхность механическая «рука». За ним тянулся провод, связывающий его с основным аппаратом, с которого орбитальный аппарат должен был передавать данные на Землю. Он успел передать только одну фотографию, дальше связь с ним прервалась.

Сейчас вокруг Марса летает очень много аппаратов, также много работает на его поверхности (рис. 1.26а).

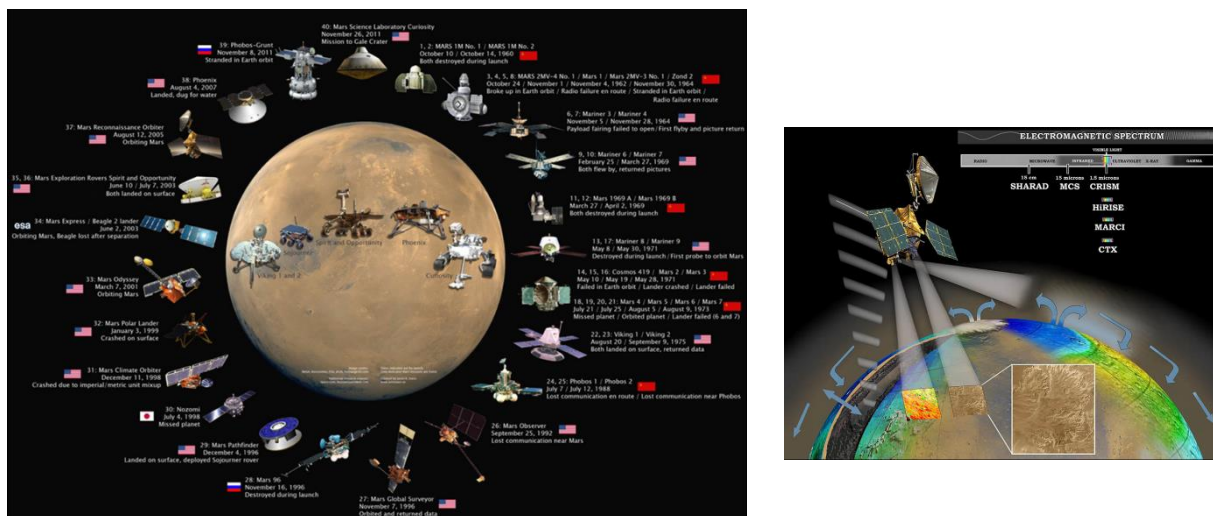


Рис. 1.26. а) спутники, летающие сейчас вокруг Марса, б) спутник Марса MRO

Самый полезный из спутников – MRO (рис. 1.26б) летает уже 13 или 14 лет. Он передаёт очень хорошие снимки, и на них недавно обнаружили дыры в поверхности Марса. Скорее всего, это провалы или пещеры, там можно поискать что-то живое.

Последнее поколение марсоходов – «Кьюриосити» (рис. 1.27) и «Персеверанс». Первый просто ездит по Марсу и исследует его, а второй собирает образцы марсианского грунта, складывает в титановые пробирки и оставляет на своём пути. А следующий

прилетит через несколько лет, соберёт эти пробирки, упакует в контейнер, поместит в ракету и отправит на Землю.

«Кьюриосити» на Земле весит почти тонну, на Марсе в 2,5 раза меньше, но всё равно тяжёлый. Тоненькие алюминиевые колеса не выдерживают острых марсианских камней, так что он сейчас ездит очень медленно и аккуратно между камнями.



Рис. 1.27. Марсоход Кьюриосити на Марсе

Исследование **малых тел** Солнечной системы продвигается, но довольно медленно. Первым **астероидом**, к которому мы подлетали, был **Эрос**. Теперь мы уже пролетали мимо многих астероидов и знаем, как выглядит их поверхность (рис. 1.28а). Но практически ни с одного не привезли на Землю образцы грунта и уж точно ни один не бурили.

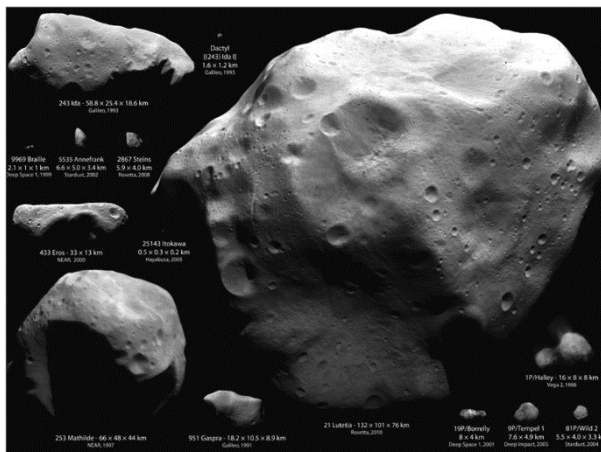


Рис. 1.28. а) фотографии малых тел Солнечной системы в одном масштабе, б) зонд «Hayabusa» рядом с астероидом Itokawa

Единственный астероид, с которого что-то получили, – **Itokawa**. Он маленький: 300 м. К нему подлетал японский зонд, отщипнул несколько песчинок и доставил на Землю (рис. 1.28б). Ничего неожиданного в них не обнаружили.

С **комет** тоже был доставлен небольшой образец. Это был эксперимент «**Stardust**». Машина подлетела в хвост кометы, не приближаясь к ядру, потому что там поток газа смёл бы её, и набрала песчинки, которые летели вместе с газом с поверхности кометы, в специальную ловушку (рис. 1.29а).

**Ловушка** (рис. 1.29б) – это алюминиевая матрица, дырочки в которой заполнены аэрогелем. Этот материал ничего не весит, но в то же время твёрдый, потому что это

мелко спененное аргонное стекло, по сути это аргон внутри стеклянной матрицы, там пузырьки микронного размера или даже меньше.

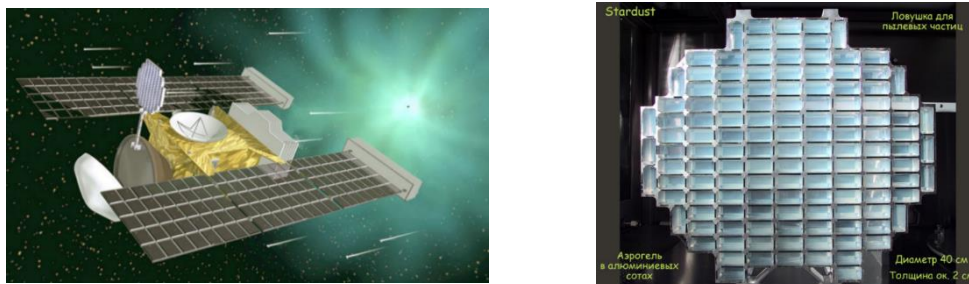


Рис. 1.29. (а) эксперимент «Stardust» (NASA), (б) ловушка для пылевых частиц

Если частицы летят со скоростью несколько километров в секунду, то при ударе о просто металлическую поверхность они будут испаряться. А тут они проникают внутрь вещества, похожего на холодец, медленно тормозятся и остаются внутри.

Потом капсула с ловушкой прилетела на Землю, ловушку достали, и внутри надо было найти очень маленькие частицы кометы. Микроскоп всё просканировал на глубину слоями. Несколько сотен тысяч фотографий, сделанных через микроскоп, выложили в сеть и сказали, что в честь того, кто найдёт на фотографиях частицу кометы, эту частицу назовут. В итоге все частицы были найдены за неделю.

Единственное хорошо изученное **ядро кометы Чурюмова-Герасименко** (рис. 1.30а). Эту комету обнаружили в 1969 г., а в 2014 г. к ней подлетел европейский зонд, вышел на орбиту, и теперь мы имеем снимки с поверхности кометного ядра.

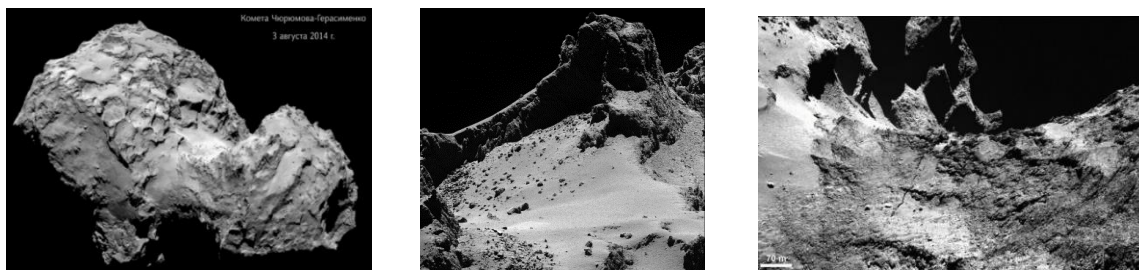


Рис. 1.30. (а) ядро кометы Чурюмова-Герасименко, (б) глыбы и (в) трещины на её поверхности

Размер этого тела километров 5, гравитация почти нулевая. Но на поверхности лежат глыбы, причём они разбросаны по долине (рис. 1.30б), хотя при почти нулевой гравитации камень катиться не будет.

Или, допустим, трещина на перешейке (рис. 1.30в) говорит о том, что там происходят какие-то тектонические процессы, комету что-то ломает изнутри или снаружи.

**Планеты-гиганты** тоже исследуются, в основном пролётными зондами. У **Юпитера** искусственные спутники побывали два раза, у **Сатурна** один.

**Естественные спутники** планет-гигантов тоже интересно исследовать, каждый представляет из себя отдельный мир.

На один объект полезно смотреть с разных точек зрения. Когда аппарат «Кассини» залетел за ночную сторону **Сатурна**, мы увидели, что между кольцом Сатурна и поверхностью не пустота, а тоже **вещество** (рис. 1.31а). Так происходит, потому что если размер пылинки сравним с длиной волны света, то свет не отражается, но дифракция заставляет его менять направление. То есть он рассеивается на мелких частицах, а дальше идёт немного другими путями. Солнце за диском планеты, но мы видим рассеянный свет с противоположной стороны.



Рис. 1.31. (а) - фотографии Сатурна со стороны дневной и ночной стороны в одном масштабе, (б) – спутник Сатурна Энцелад

Таким образом, на верхнем изображении там, где кажутся тёмные полосы, частицы мелкие, а где светлые, крупные. Однако непонятно, как в кольце Сатурна вещество поделилось на отдельные фракции по размеру частиц? На рис. 1.31а два изображения сведены в один масштаб.

Мы будем подробно говорить о спутниках Сатурна, особенно про полёт Кассини, это самая дорогая в истории космонавтики экспедиция. Он нашёл многое, например **спутник Сатурна Энцелад** (рис. 1.31б), на поверхности которого лёд раскололся отдельными трещинами, и оттуда бьют фонтаны воды. Значит, подо льдом действительно вода.

А **спутник Сатурна Титан** – вообще настоящая планета. На Титане есть атмосфера земного типа, состоящая на 95% из азота. Она толстая (рис. 1.32а), давление у поверхности 1,5 атмосферы, однако температура минус 180 °С.

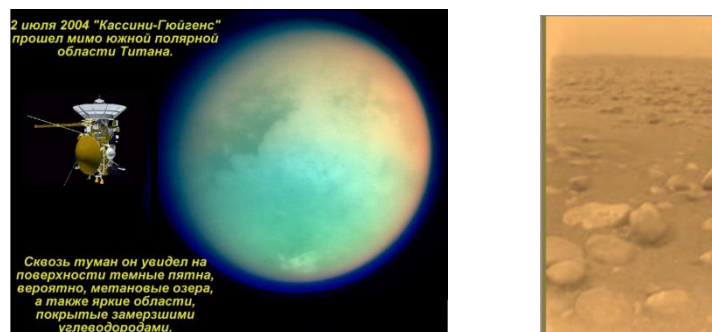
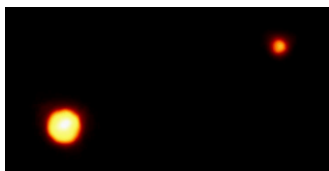


Рис. 1.32. (а) – атмосфера Титана, (б) – фотография поверхности Титана

Посадка на поверхность другой спутника планеты была всего один раз. Аппарат «Гюйгенс» приземлился на поверхность Титана и передавал фотографии его ландшафта (рис. 1.32б).

А ледяные гиганты – **Уран, Нептун**, - исследованы очень слабо.

Про **Плутон** мы тоже знаем очень мало. На рис. 1.33 представлена лучшая фотография Плутона и его спутника **Харона**, полученная телескопом «Хаббл». А в 2015 г. пролетел космический зонд, и мы впервые увидели поверхность Плутона.



*Рис. 1.33. Фотография Плутона и его спутника Харона, сделанная телескопом «Хаббл»*

## Лекция 2. Общие свойства Солнечной системы

Теперь поговорим об общих свойствах Солнечной системы. Самое общее свойство – её внешний вид.

### Параметры планет и их спутников

**Параметры Солнечной системы** следующие. 99,86% массы Солнечной системы заключено в Солнце. 99,5% общей массы планет заключено в планетах-гигантах. При этом 71% общей массы планет гигантов заключен в Юпитере (рис. 2.1).

Т. к. на планеты и прочие малые тела остаются доли процента массы, все объекты Солнечной системы движутся под действием солнечной гравитации и почти не ощущают взаимодействия друг с другом.

Но при этом почти весь **момент импульса** (количество движения, количество вращения) Солнечной системы заключён в орбитальном движении Юпитера и Сатурна. А на Солнце приходится его малая доля, потому что Солнце очень медленно вращается. Это одна из загадок: как получилось, что масса ушла в одно место, а момент импульса оказался в другом, хотя всё это рождалось из одного медленно вращающегося облака газа, где масса и момент были примерно равномерно распределены по объёму облака. Значит, их разделил какой-то физический механизм.

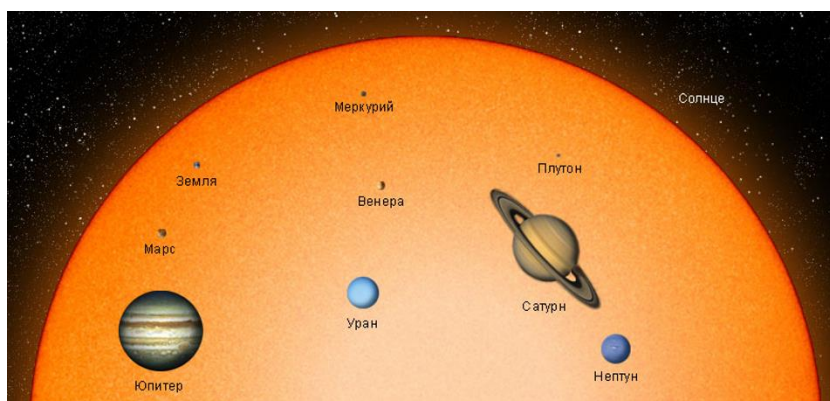


Рис. 2.1. Масса Солнца и планет Солнечной системе в масштабе

Мы уже говорили, что у каждой звезды есть **внешняя область**, которую она контролирует, но недостаточно надёжно (рис. 2.2). Особенно **облако Оорта**, оно преобразуется при близких взаимных пролётах звёзд. Но раз оно существует, значит, звёзды не так сильно влияют друг на друга, особенно здесь, вдали от центра галактики, где они редко распределены, медленно движутся и не так часто сближаются друг с другом.

Д. Койпер, в честь которого названа внутренняя часть периферии Солнечной системы, утверждал, что в этой области не должно быть объектов. А когда начали там открывать объекты, эту область назвали **поясом Койпера**. А вот, например, астроном Э. Эджворт даже опубликовал статью о том, что в этой области должны быть небольшие тела. Поэтому европейские астрономы пишут «пояс Эджворта – Койпера».



Мы иногда видим кометы, прилетающие почти, а иногда точно по параболическим орбитам, а иногда по гиперболическим орбитам, но уверены, что они принадлежат Солнечной системе. Мы говорим, что тело уйдёт не дальше, чем в пояс Койпера. Мы на Земле находимся внутри **гравитационной ямы**, которую обеспечивают планеты-гиганты. Когда объект пролетает по параболической или даже по эллиптической орбите мимо планет-гигантов, они его разгоняют, поэтому внутри Солнечной системы он может двигаться по гиперболе, а потом, выходя за пределы орбит планет-гигантов, снова перейти на эллипс. Я. Оорт это понимал и предсказал, откуда прилетают такие тела.

Единства в **названиях внешних областей** Солнечной системы нет (рис. 2.2).

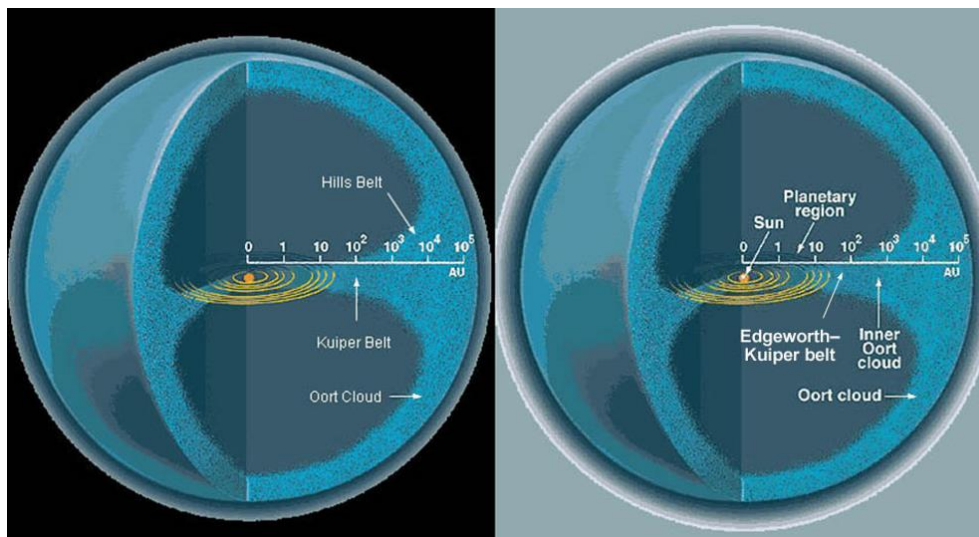


Рис. 2.2. Разные названия областей Солнечной системы

Когда внешняя звезда пролетает, она вызывает **возмущения в движении объектов**. Некоторые объекты улетают, другие бросает к центру Солнечной системы (рис. 2.3а). Они иногда бьют по планетам, так что время от времени рядом с Солнцем случаются кометные дожди.

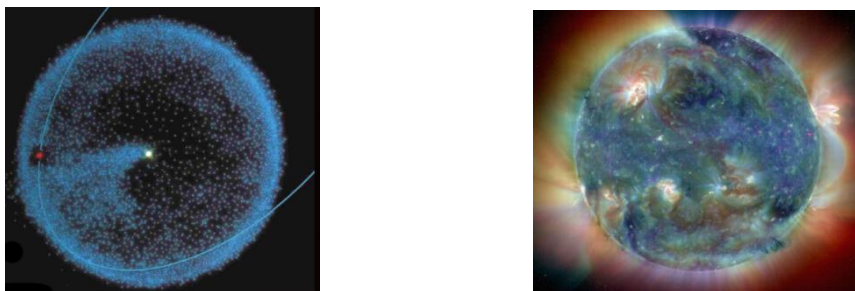


Рис. 2.3. (а) возмущения в движении объектов из-за пролёта внешней звезды, (б) магниты на поверхности Солнца

Солнце – звезда, она испаряется, солнечный ветер (плазма) летит, несёт с собой **магнитное поле**. Его признаки видны невооружённым глазом: на поверхности Солнца видны двухполюсные магниты (рис. 2.3б)

Если посмотреть на соседние звёзды, области столкновения собственного газа звезды и межзвёздного газа можно увидеть. Также видна **ударная волна**, и по её форме можно сказать, с какой скоростью летит звезда (рис. 2.4а).

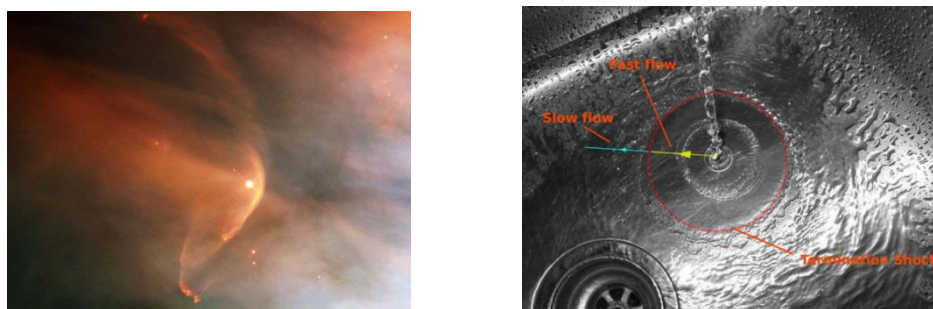


Рис. 2.4. (а) ударная волна при столкновении собственного газа звезды и межзвёздного, (б) аналогичный эффект в раковине

Рассмотрим опыт, который будет демонстрировать ту же физику и который можно провести у себя дома (рис. 2.4б). Тонкая струйка падает на раковину, разбивается симметрично (осевая симметрия), вода течёт и вдруг где-то останавливается. В этом месте динамическое движение (давление,  $\rho v^2$ ) сравнялось со статическим движением воды, которая наполняет эту раковину. Происходит шок, ударная волна. При изменении напора струи меняется радиус.

**Орбиты** практически всех **больших планет** лежат в одной плоскости. А вот орбиты **малых тел** довольно сильно наклонены к общей для планет плоскости эклиптики (рис. 2.5). Кстати, экватор Солнца не совпадает с плоскостью движения планет, и тоже непонятно, почему.

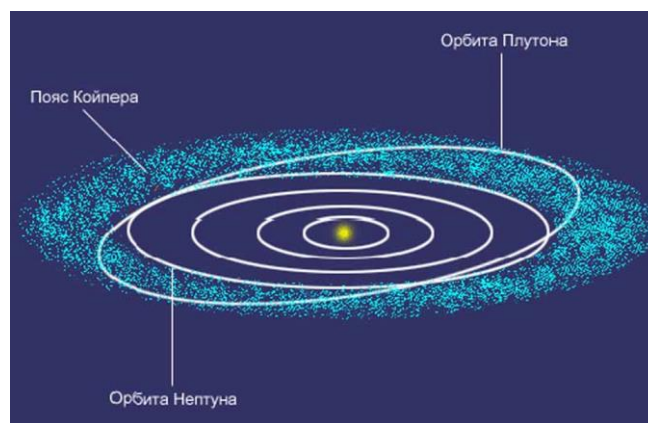


Рис. 2.5. Орбиты больших планет и малых тел Солнечной системы

Перейдём к **Плутону**. Сначала мы видели в телескопы только пятно. В 1978 г. Дж. Кристи на этом пятне заметил маленькое пятнышко и, став наблюдать, выяснил, что тот движется за 6,5 суток вокруг большого пятна (рис. 2.6а). Таким образом был открыт **Харон** – крупнейший спутник Плутона.

Нам повезло, т. к. через несколько дней Земля оказалась в плоскости орбитального движения Харона, и тот стал проходить то перед Плутоном, то за ним. Их

суммарная яркость менялась, как и у любой затменной системы. Пронаблюдав много таких проходов, построили **карту поверхностной яркости Плутона** (рис. 2.6б).

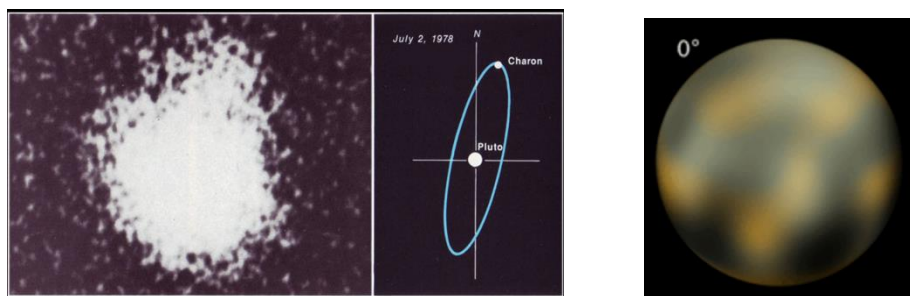


Рис. 2.6. (а) – Плутон и Харон, (б) – карта поверхностной яркости Плутона

С Земли мы слабо различали Плутон и Харон, а на снимке с «Хаббла» это уже видно чётко (рис. 2.7а), но всё равно как точки.

Пока «New Horizons» летел к Плутону, «Хаббл» открывал всё новые спутники Плутона. Сначала два маленьких: **Ник** и **Гидра**, потом **ещё два**. К моменту подлёта к Плутону космического аппарата мы уже знали, что у него есть крупный спутник Харон, а если добавить чёрную заслонку, закрывающую их свет (рис. 2.7б), видны ещё два средних и два совсем маленьких спутника.

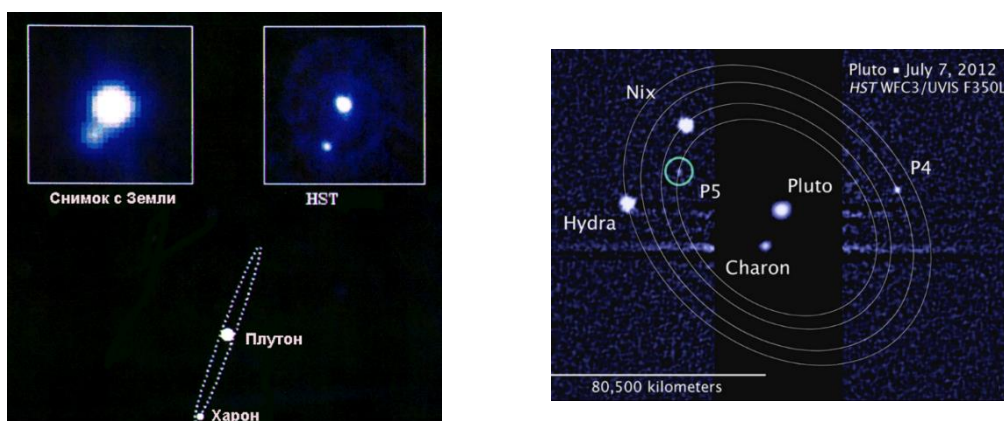


Рис. 2.7. (а) снимки Плутона и Харона с земного телескопа и с «Хаббла», (б) открытые спутники Плутона

С этим тоже связана загадка. Они движутся по близким орбитам. Если бы в центре была точечная масса, ничего удивительного не было бы, но здесь практически двойная планета: Харон по массе всего в 8 раз уступает Плутону. Гравитационное поле в таком случае становится неоднородным, а орбиты – очень неустойчивыми, однако другие спутники всё равно летают.

Аппарат «**New Horizons**» (рис. 2.8а) пролетел в 2015 г. Он был очень интересный. Его построили на минимальные деньги. У него ничего не вращается: антенна и объективы жёстко привязаны к корпусу. Другие аппараты, те же **Вояджеры**, могли, пролетая мимо планеты, направлять камеры на неё и её спутники, а радиоантенну на Землю, а этот мог разворачиваться только корпусом. Он сначала исследовал планету, не

поддерживая связь с Землёй, и накапливал на флешке все фотографии и прочие данные, а потом, пролетев мимо Плутона, повернул антенну на Землю и 1,5 года передавал то, что в течение нескольких суток фотографировал (был далеко, поэтому передавал медленно).

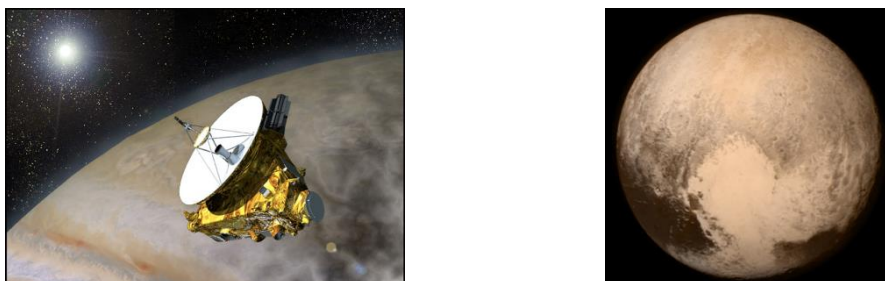


Рис. 2.8. (а) *New Horizons*, (б) его фотография Плутона

Переданные данные всех потрясли. Мы ожидали, что раз Плутон далеко от Солнца, значит, холодный. Сам себя он согреть не может, потому что маленький (Луна не может себя согреть, а он в несколько раз меньше Луны). Но на фотографии увидели **белое пятно** (рис. 2.8б). Вокруг метеоритные кратеры, значит, это старая поверхность, на которую несколько миллиардов лет падали метеориты. А на пятне ни одного, значит, она образовалась недавно. Что-то разлилось из-под поверхности и разлилось таким озером. Скорее всего, это замёрзший азот, но раз он вылился изнутри, значит, внутри тепло, там происходит какая-то геология, биологическая жизнь. Тогда возникают вопросы: почему он не остыл, какие источники тепла в нём действуют?

Пятно назвали именем первооткрывателя Плутона – К. Томбо.

На рис. 2.9 показано, как Плутон и Харон выглядят рядом. Соотношение размеров примерно 1:2, масса 1:8. Такой пары в Солнечной системе больше нет.



Рис. 2.9. Сравнение параметров Плутона и Харона

Многие **названия на Плуtone** (рис. 2.10а) в честь космических аппаратов.

Ещё одним неожиданным фактом оказалось то, что у Плутона есть **атмосфера** (рис. 2.10б). Она очень разреженная – в 100 тыс. раз жиже нашей. Но вообще непонятно,

как она удерживается на таком холодном маленьком теле. Увидели это только в контровом солнечном освещении, залетев за тёмную ночную сторону. Атмосфера в основном из азота.

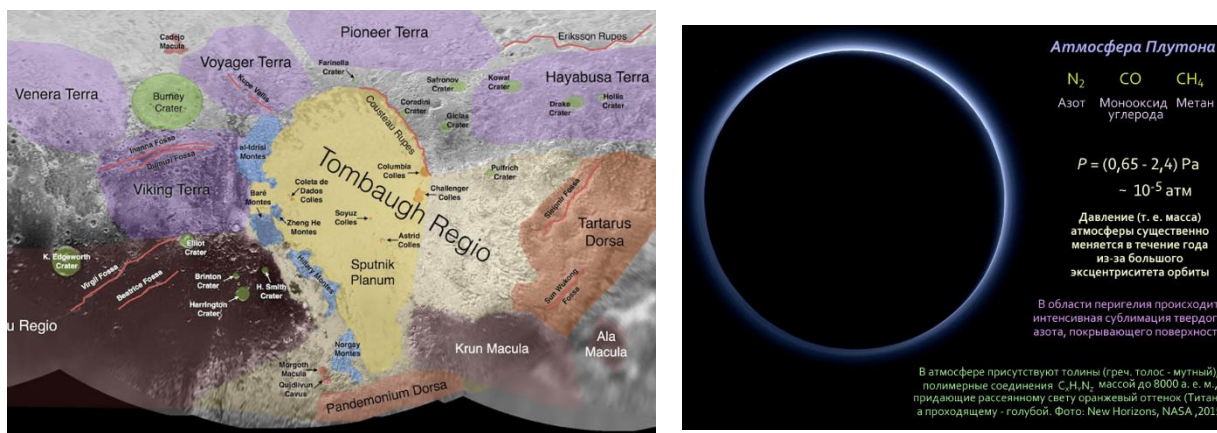


Рис. 2.10. а) названия объектов на поверхности Плутона, б) атмосфера Плутона

**Поверхность Плутона** (рис. 2.11а) – тоже загадка. Атмосферы почти нет, значит, ветра нет, но на поверхности есть дюны, которые возникают обычно, когда ветер носит песчинки, снежинки и т. д.

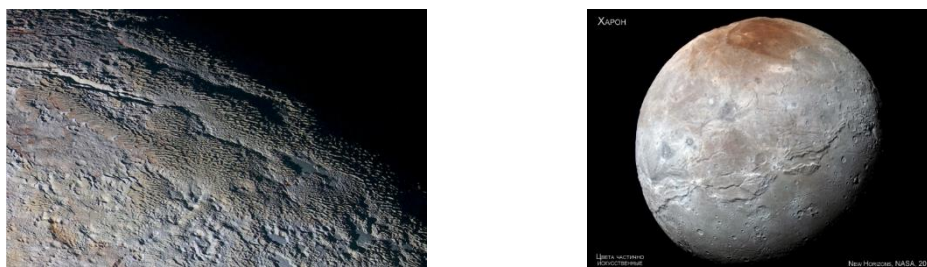


Рис. 2.11. (а) поверхность Плутона, дюны, (б) поверхность Харона

Также удивительна география Харона. У него есть странный разрыв поверхности вдоль экватора (рис. 2.11б). А также мы привыкли видеть на полюсах белые снежные шапки, а у Харона там красное пятно.

Плутон изгнали из семейства больших планет, по этому поводу до сих пор идёт спор, но вообще Плутон – **карликовая планета**. Планета – потому что круглый, значит, сила тяжести победила там твёрдость материала и придала гидростатическую форму. Тем более что-то изливается из недр, значит, там что-то плавится, застывает, вещество движется. А карликовая – потому что такая маленькая масса, что гравитация любой планеты может его забросить куда угодно, а он сам никого не может сбить с орбиты.

На рис. 2.12 представлено **семейство планет-карликов**. Пока их пять: Плутон, Эрида, Хаумеа, Макемаке и бывший крупный астероид Церера, т. к. тоже сфероидальный. Но есть ещё кандидаты в эту группу (рис. 2.14б) – объекты примерно такого же размера.

М. Браун подсчитал, что в Солнечной системе как минимум 10 планет-карликов, а с некоторой натяжкой даже несколько сотен, просто мы их пока не обнаружили. Расчёты показали, что если тело ледяное, то уже при диаметре больше 400 км лёд не выдерживает собственной гравитации, и тело планеты округляется. Если чисто каменное – такое происходит при диаметре 900 км. Например, у каменно-ледяной Цереры диаметр 950 км.



Рис. 2.12. Планеты-карлики и кандидаты в эту группу

Переход от планет к не планетам довольно равномерный. На рис 2.13а. представлены Земля, Венера, Марс, Меркурий, Луна. Между последними нет никакой ступеньки, но малые тела обычно привязаны к другим. Таких спутников у планет (рис. 2.13б) примерно дюжина. Все они круглые, каждый со своей геологической историей и функционированием. Например, на Европе океаны, бьют гейзеры. Титан – вообще полноценная планета размером с Меркурий, имеет атмосферу.



Рис. 2.13. (а) планеты земной группы и Луна, (б) планеты-спутники

М. Браун и К. Батыгин ищут девятую планету Солнечной системы. Браун открыл много объектов в поясе Койпера, и оказалось, что все их орбиты (эллиптические) большими осями направлены в какую-то одну сторону, примерно в одну четверть круга (рис. 2.14а). Он рассчитал много динамических моделей, и у него получилось, что если в Солнечной системе есть массивная девятая планета очень далеко от Солнца, примерно на расстоянии 1000 а. е., то она своей гравитацией могла бы заставить остальные мелкие тела двигаться так, как они движутся.

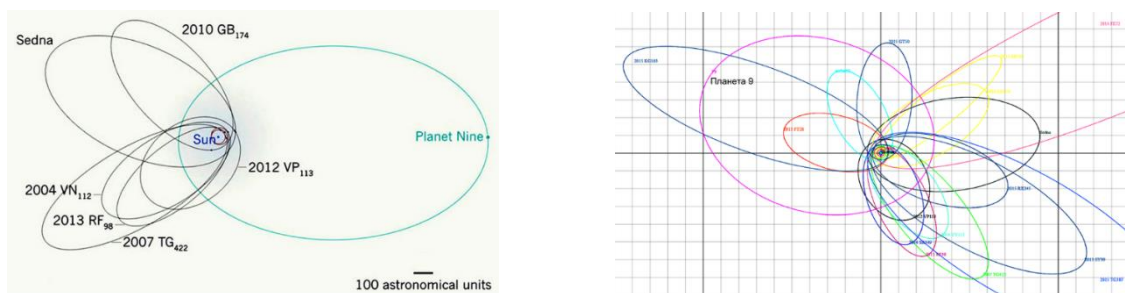


Рис. 2.14. (а) орбиты объектов в поясе Койпера и предполагаемой девятой планеты, (б) орбиты объектов, заполняющих пустоту

Девятую планету пока не нашли, но нашли **много мелких**, которые начинают заполнять пустоту (рис. 2.14б), и эта гипотеза уже не кажется настолько убедительной.

У **других звёзд** тоже есть такие **внешние области**. На рис. 2.15а  $\beta$ Pic, и когда мы фотографируем, закрыв саму звезду, видим **протопланетный диск** (звезда ещё молодая), и некоторая его часть наклонена примерно как орбита Плутона к нашей Солнечной системе.

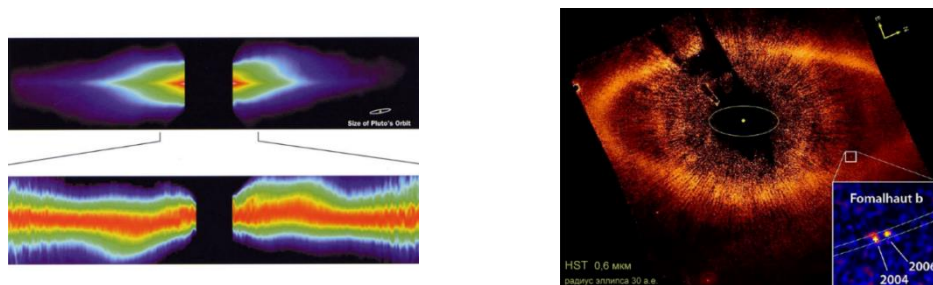


Рис. 2.15. (а) – внешние области звезды  $\beta$ Pic, экзопланеты Fomalhaut b

Видно, что наша планетная система не единственная, с 1995 г. мы открываем **экзопланеты** и даже иногда можем их сфотографировать (рис. 2.15б). На снимке точка перемещается в пылевом кольце. Есть предположение, что это планета-гигант, но настолько молодая, что окружена протоспутниковым диском, иначе мы бы её не увидели.

Если все большие планеты лежат в одной плоскости, то с удалением от Солнца мы видим, что уже у Плутона **орбита наклонена** на 17 градусов, а дальше в поясе Койпера всё сильнее и сильнее (рис. 2.16а). Так происходит, потому что солнечная гравитация ослабевает с расстоянием, и там уже влияние планет оказывается заметно.

У каждой **планеты-гиганта** своя **система спутников**, и они в каком-то смысле напоминают маленькие Солнечные системы. Например (рис. 2.16б), внутренние спутники Сатурна все в одной плоскости, движутся все в одном направлении, и нет сомнения, что они сформировались вместе с планетой. А у внешних спутников плоскость орбиты направлена под разными углами, они летят в разные стороны, и почти нет сомнений, что это захваченные астероиды, и они временно около него.

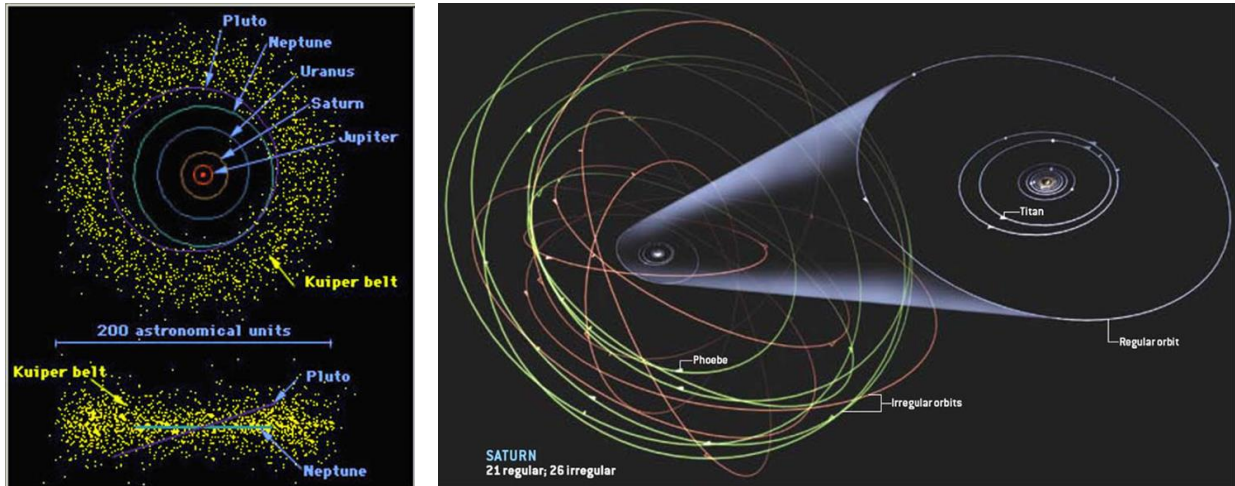


Рис. 2.16. а) наклон орбит планет Солнечной системы и объектов пояса Койпера, б) орбиты спутников Сатурна

То же самое у **Юпитера** (рис. 2.17). А у Урана и Нептуна пока известно мало спутников, сложно что-то сказать.

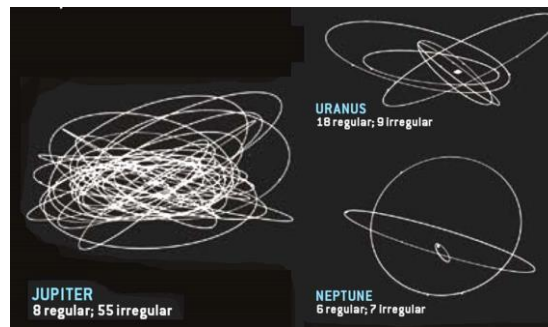


Рис. 2.17. Орбиты Спутников Юпитера, Урана, Нептуна

### Астероиды

**Пояс астероидов** зажат между орбитой Марса и далеко отстоящей орбитой Юпитера (рис. 2.18). Почти весь миллион астероидов, обнаруженных на сегодняшний день, там, потому что их там было легче открыть.

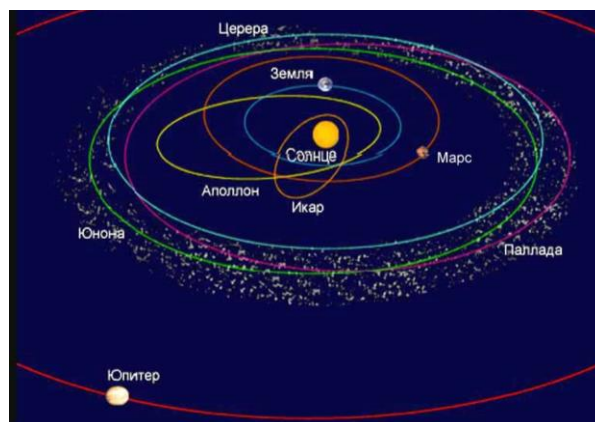


Рис. 2.18. Пояс астероидов



Но некоторые астероиды движутся оригинально. Например, **Греки** и **Троянцы** (рис. 2.19а) в точках Лагранжа, где небольшие потенциальные ямки в поле тяготения **Юпитера** и **Сатурна**, там медленно движущиеся астероиды на некоторое время застывают, колеблются по орбите, потом уходят, а новые приходят. Но это всё надо проверять, и сейчас туда летит космический зонда NASA.

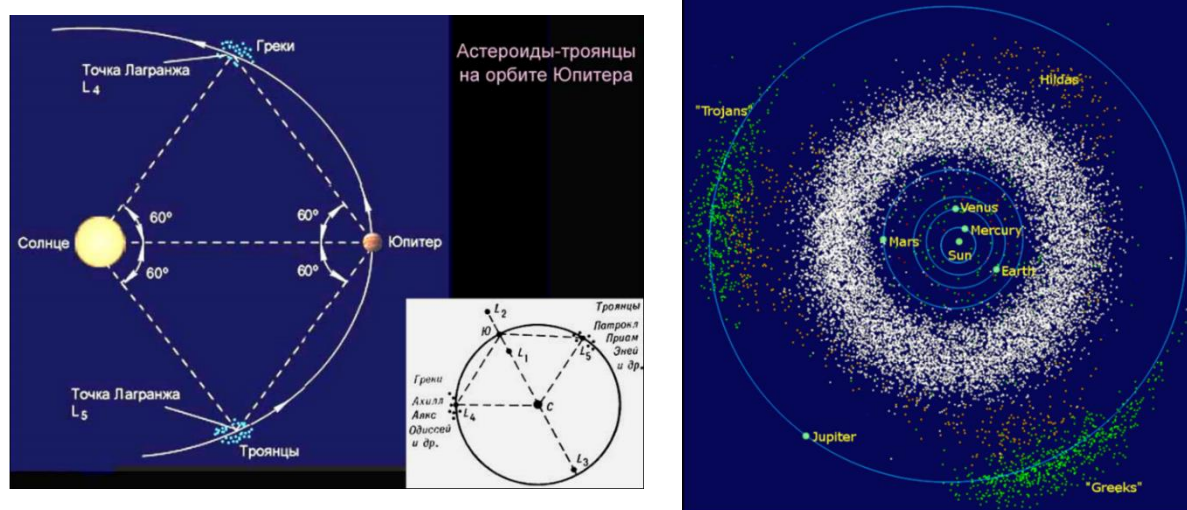


Рис. 2.19. (а) – Астероиды-греки и астероиды-троянцы на орбите Юпитера, (б) – положение астероидов в конце 90-х годов

На рис. 2.19б в конце 90-х годов точно нанесли **моментальное положение астероидов** главного пояса и **Греков** и **Троянцев**. Видно, что у последних потенциальные ямы неглубокие, поэтому они не точно в точке Лагранжа придерживают объект, а лишь немного притормаживают. Когда Юпитер делает 1 оборот, они тоже делают 1 оборот спереди или сзади по его орбите.

Есть ещё семейство **Hildas** – это астероиды, у которых орбитальный период на  $2/3$  короче. Они идут в афелий, проходят перигелий и снова идут в афелий. Таким образом они всегда оказываются в афелии по другую сторону от Юпитера, и от их не трогает своей гравитацией.

Довольно продуктивно можно открывать **астероиды в инфракрасном диапазоне**. Они все чёрные, плохо отражают свет, но хорошо поглощают. Солнечные лучи нагревает астероид, и он начинает светиться в инфракрасном диапазоне. Такой небольшие **спутник WISE**, как на рис. 2.20а, с маленьким инфракрасным телескопом, и чуть ли не за полгода открыл более 33500 новых объектов.

**У Земли** тоже есть **Троянцы**. До прошлого года мы знали один Троянец, сейчас открыли второй. Но они странные. Например, на рис. 2.20б показан Троянец, который не движется вокруг точки Лагранжа, а гуляет от одной точки к другой. В системе координат, связанной с вращением Земли вокруг Солнца, он выписывает подковообразные орбиты. Снаружи у него орбитальный период чуть длиннее, чем у Земли, постепенно он приближается к Земле, чувствует её гравитацию. Земля тормозит его, и он переходит на

более низкую орбиту, а там у него орбитальный период короче земного, и он обгоняет Землю несколько десятков тысяч лет, а дальше приближается к ней с другой стороны. Земля тянет его к себе, увеличивая его кинетическую энергию, и он переходит на более высокую орбиту и начинает отставать от Земли.

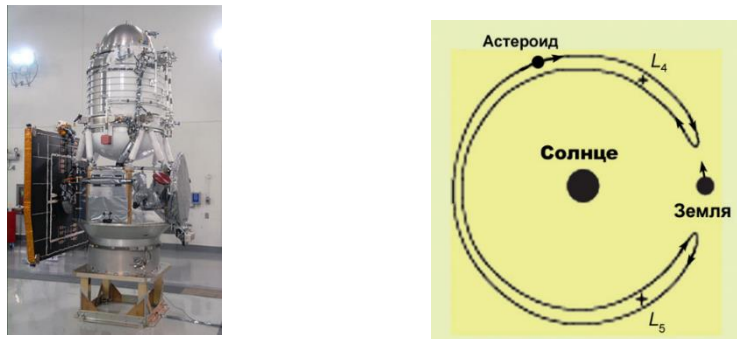


Рис. 2.20. (а) спутник WISE, (б) земные Троянцы

### Процессы, влияющие на планеты

Мы уже говорили, какие **силы действуют на планеты**. Мы разбирали, как действуют **приливные силы** на вращающиеся тела, как сама Земля действует на Луну, как спутники планет разогреваются за счёт приливного взаимодействия.

Приливы могут иногда **разрушать небольшие тела**. Пролетая мимо Юпитера, ядра комет иногда лопаются под действием приливного напряжения. В 1993 г. на фотографии с Хаббла обнаружилась череда маленьких комет (рис. 2.21а). Было ясно, что так распалась одна комета, потому что встреча 20 комет на одной орбите – событие маловероятное. Посчитали назад и поняли, что рядом с Юпитером год назад пролетала комета, и прилив её разрушил. Дальше посчитали вперёд и определили, что через год все осколки врежутся в Юпитер.

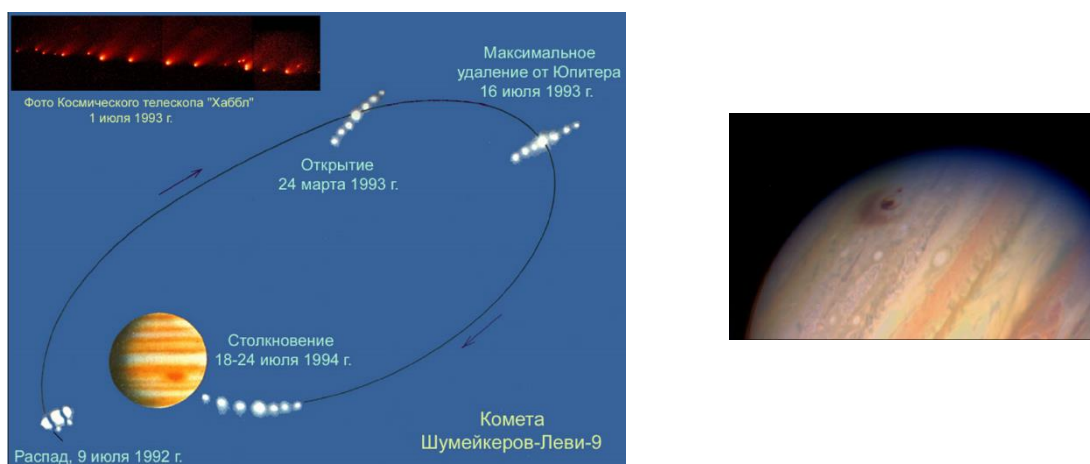


Рис. 2.21. а) разрушение кометы Шумейкеров-Леви-9, б) место удара осколка кометы о поверхность Юпитера

Врезались эти глыбы в ночное полушарие, а мы всегда смотрим с Земли на Юпитер со стороны Солнца. Но за счёт вращения планеты уже через час-полтора место

удара выезжало на дневное полушарие, и можно было заглянуть под верхний облачный слой. Взрывы были колоссальные, от них оставались пятна размером с земной шар (рис. 2.21б)

**Кольцо Сатурна** – тоже интересная вещь. С дневной стороны оно хорошо отражает свет, а ночная совсем другая, т. к. свет может либо отражаться, либо рассеиваться частицами разного размера.

Планеты **теряют атмосферу**. Она испаряется: быстрые атомы и ионы улетают, потому что быстро движутся (рис. 2.22а). Есть разные механизмы испарения планетных атмосфер. Иногда их сносят потоки солнечного ветра механическим путём.

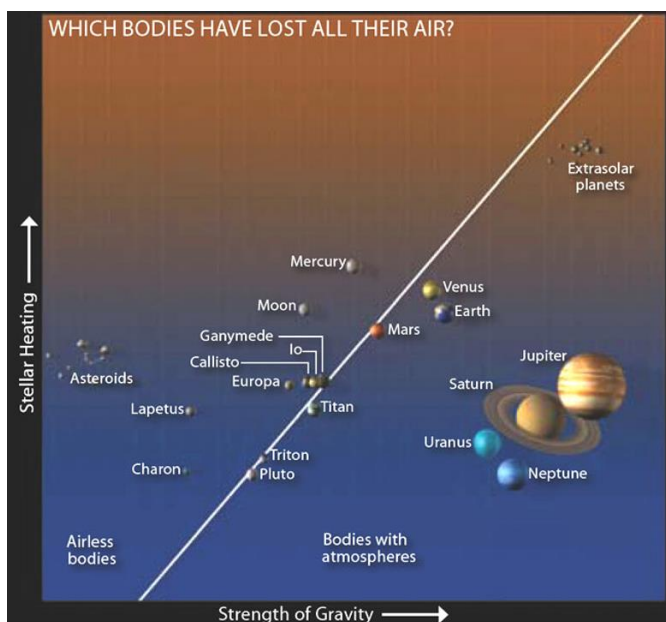


Рис. 2.22. а) испарение атмосферы, б) планеты и другие объекты, удерживающие атмосферу и те, которые её теряют

Земля теряет каждую секунду 3 кг водорода и 50 г гелия. Через 3 млрд лет почти вся атмосфера и океаны улетят с поверхности Земли.

На плоскости, где по одной оси сила тяжести, а по другой интенсивность солнечного нагрева (рис. 2.22б), можно провести довольно чёткую **границу** между планетами, которые **удерживают атмосферу** (сила тяжести большая, а Солнце не так уж сильно их нагревает), и телами, которые не в состоянии её удерживать (например, астероиды с почти нулевой силой тяжести). А есть пограничные объекты: Титан чуть-чуть в области сохранения атмосферы, а у Марса, точно лежащего на границе, её почти не осталось.

**Динамические эффекты солнечного света** - эффекты Ярковского и Пойнтинга-Робертсона мы уже обсуждали. Они в основном влияют на движение маленьких частиц.

Эффект **Пойнтинга-Робертсона** (рис. 2.23а) – это отклонение давления света на движущиеся объекты, то есть, по сути, абберация светового луча, влияет только на

мелкие частицы. А эффект **Ярковского** (рис. 2.23б) – на мелкие кометы и метеороиды размером в несколько метров. Это эффект нагрева небесного тела, инфракрасный свет уходит с тёплой поверхности, и реакция отдачи толкает планету либо вперёд, либо назад, в зависимости от того, куда происходит суточное вращение.

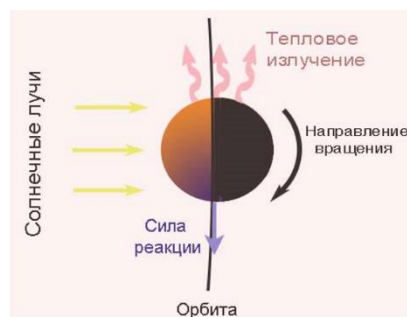
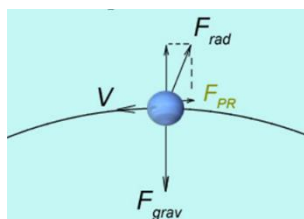


Рис. 2.23. (а) эффект Пойнтинга-Робертсона, (б) эффект Ярковского

Ещё раз отметим, что мы не знаем, что происходит **в районе Солнца**. Иногда удаётся прикрыть Солнце заслонкой и увидеть яркие объекты (рис. 2.24), но маленьких тел там может быть много, и мы не знаем, какие они. Если обнаружить такой маленький объект рядом с Солнцем, там можно будет сделать обсерваторию и изучать Солнце с близкого расстояния, скрываясь от лучей под поверхностью.

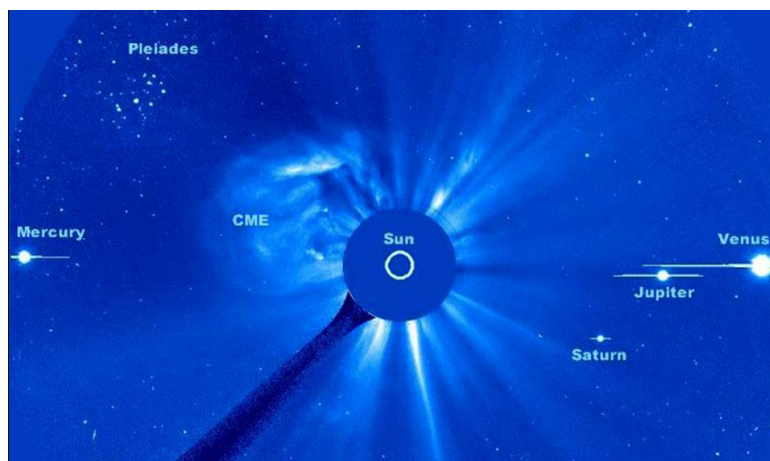


Рис. 2.24. Яркие объекты вблизи Солнца

## Лекция 3. Планеты. Поверхность и атмосфера

### Поверхности тел Солнечной системы

Планеты подвергаются разным воздействиям, меняются, эволюционируют. Основные **внешние и внутренние силы**, которые заставляют планету эволюционировать, представлены на рис. 3.1.

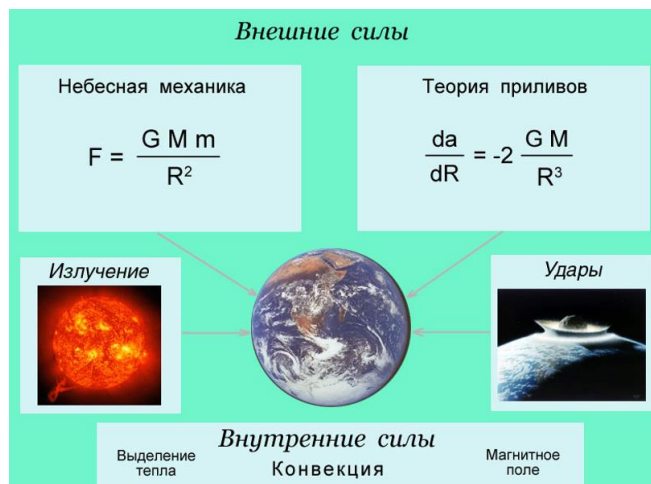


Рис. 3.1. Внешние и внутренние силы, действующие на планету

Слева обычная небесная механика, то есть планета куда-то летит как целое под влиянием гравитации других тел. Справа теория приливов: планета как-то меняется, потому что в разных её точках гравитация внешних тел немного разная. Излучение действует на планету только снаружи, модифицирует верхний слой. Прямые соударения тоже очень важны, особенно в период формирования звёздной системы.

О **поверхностях** мы мало что знаем, только смотрим на них снаружи. Посадочные аппараты были на поверхностях Венеры и Марса. Также в атмосферу Юпитера сбросили исследовательский зонд, он несколько часов спускался на парашюте. Это были единственные прямые измерения планет-гигантов.

Первый **астероид**, к которому мы подлетели (зонд NEAR Shoemaker) – **Эрос** (рис. 3.2а). У него гравитация маленькая, поэтому зонд летал вдоль поверхности со скоростью 1 м/с. Поверхность астероида как на Луне. Зонд попробовали посадить, приблизили к поверхности, он коснулся поверхности и пропал. Очень рыхлый верхний слой грунта его поглотил.

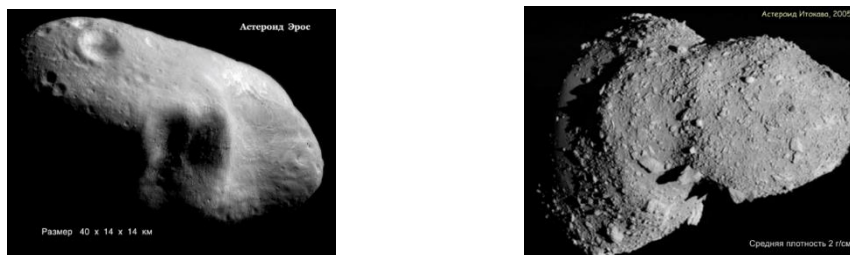


Рис. 3.2. (а) астероид Эрос, (б) астероид Итокава

Следующие полёты к астероидам были более осторожные. К астероиду **Итокава** (рис. 3.2б) подлетел Японский зонд «Hayabusa», но не касался. Этот астероид маленький, всего 300 м в длину. Зонд хотел сбросить туда маленький посадочный аппарат, его толкнули, он пошёл к астероиду, прошёл мимо и улетел в космос. Оказывается, маленькая гравитация – тоже проблема: когда сажаешь аппарат на большую планету, куда бы ни его ни кинули, планета его притянет, а работая с маленькими телами, надо точно прицелиться.

Потом зонд подлетел к поверхности и на расстоянии нескольких метров взял пробу грунта. Он выстрелил маленькими металлическими шариками, они воткнулись в поверхность, поверхность выбросила из себя частицы грунта, и они попали в маленькую воронку на аппарате. Это был первый грунт, полученный с астероида. Потом у этого зонда испортился двигатель, но за несколько лет он всё равно долетел до Земли.

Самая исследованная **комета (ядро)** – комета **Чурюмова-Герасименко** (рис. 3.3). Она не была никому интересна, пока к ней случайно не подлетел европейский зонд «Розетта». Объект оказался очень интересным. У него гантелеобразная форма: две отдельных части, а между ними довольно ровная поверхность. Потом было доказано, что они слиплись.



Рис. 3.3. (а) ядро кометы Чурюмова-Герасименко, (б) газ, вырывающийся из неё

Масса объекта  $10^{13}$  кг, её измерили через период обращения космического аппарата. Измерили объём (большая часть  $4,1 \times 3,3 \times 1,8$  км, меньшая  $2,6 \times 2,3 \times 1,8$  км), поделили и получили плотность  $0,47 \text{ г/см}^3$ . Можно предположить, что комета сделана из пористого камня, например, застывшей спененной лавы, имеющей много пустот.

Вообще ядра комет в основном состоят из водяного льда с плотностью  $0,9 \text{ г/см}^3$ , значит, половину объёма занимает пустота. Пока не известно, эти мелкие поры или большие пещеры.

На фотографии (рис. 3.3а) кажется, что ядро кометы яркое. На самом деле любой объект можно сфотографировать так, чтобы он казался ярким, то есть сделать большую экспозицию. А альbedo этой поверхности примерно 4-5%. Это почти чёрная поверхность, значит, лёд покрыт чёрной минеральной корой. Но тут вопрос – что за минерал, у камней коэффициент отражения обычно больше.

Когда ядро кометы **подлетает к Солнцу**, оно **нагревается** и начинает **испаряться**. На рис. 3.3б видны отдельные потоки: газ нагревается под поверхностью, превращается в пар, пробивает дырки, взламывает чёрную кору и вырывается струями.

Эти струи играют роль реактивного двигателя. Поэтому предсказать поведение комет очень трудно. Пока она подлетает к Солнцу, идёт по параболе или по эллипсу, а когда она нагрелась и начинает испускать газ, начинает менять орбиту, сложно угадать, с какой стороны работает «двигатель».

Ядро комет надо было изучить в глубину. Первый эксперимент был «**Deep Impact**» (NASA). Аппарат подлетел к комете, выбросил из себя ударник (рис. 3.4а), который пошёл вперёд. Ударник был примитивный: никелевый корпус с камерами и передатчиками, и когда приближался к комете, вёл репортаж. А основной аппарат летел за ним.

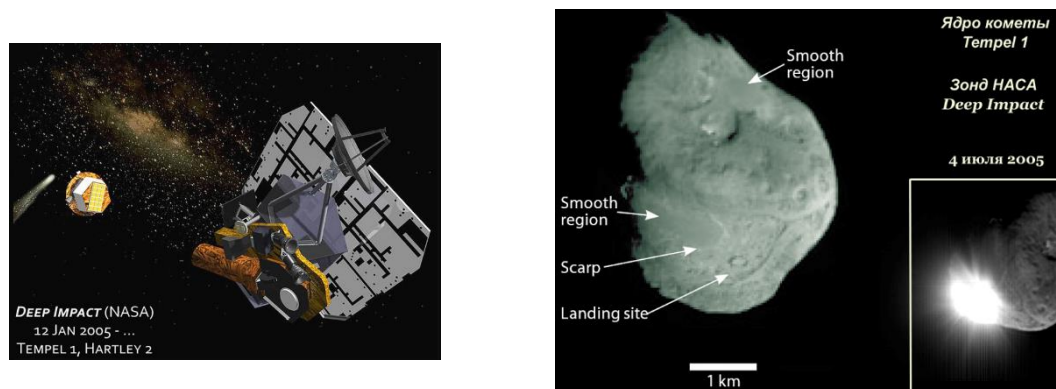


Рис. 3.4. а) Deep Impact (NASA), б) ядро кометы Tempel 1

Ударник подлетел, стукнулся с большой скоростью (примерно 8 км/с) в ядро кометы, пробил его, ушёл на глубину, кинетическая энергия превратилась в тепло, и произошёл тепловой взрыв, который выбросил много вещества. А следующий за ударником основной аппарат пролетел сквозь этот выброс и сделал химический анализ. Процентом на 80% это оказался водяной пар, ещё немного метана и каких-то формальдегидов.

После удара на комете появился новый кратер. Эта комета периодическая, через несколько лет другой космический зонд приблизился к ней и увидел этот рукотворный кратер (рис. 3.4б).

**Безатмосферные тела типа Луны** тоже выглядят непросто. Казалось бы, тело должно быть одинаковым во всех своих частях. Однако, глядя на Луну, мы видим, что это не так, и до сих пор не понимаем, почему. На её видимой **поверхности** много лавовых морей, а на обратной морей нет (рис. 3.5а). «Морские» поверхности более молодые. Это около 4 млрд лет назад изливалась лава и затапливала места сильных ударов от падений астероидов на Луну. А серые области – «материковые». Это древняя кора Луны.

Самые светлые поверхности – лучи, которые отходят от кратеров – самые молодые, потому что кратер образуется, выбрасывая вещество снизу, а оно всегда светлее, чем лежащее над ним, потому что под действием космической радиации

происходят химические реакции, и обычно вещество любой планеты темнеет. Также потемнела и поверхность комет.



Рис. 3.5. а) обратная и видимая стороны Луны, б) две фотографии обратной стороны Луны

Обратим внимание на разницу фотографий на рис. 3.5ба. На них представлена одна и та же обратная половинка Луны. Но на первой мы видим детали альбедо, то есть возникает контраст из-за того, что одни части светлее других. Это очень полезная фотография, она сделана в момент полнолуния (то есть с Земли сейчас видно новолуние). На ней можно различить разные породы с точки зрения геологии.

Однако для изучения **рельефа** нужна вторая фотография. Здесь явно видна топография, разница высот. Тут для съёмки был нужен боковой свет, который выделяет неровности, а он не может быть на целом полушарии. Поэтому фотографировали по частям в разные фазы, накопив блист терминаторных кусочков, потом их сложили и получили целую карту.

**Кратеры на безатмосферных телах** могут быть очень большими. Кратер Коперник очень молодой (рис. 3.6). Для сравнения масштаба приведена карта Москвы.



Рис. 3.6. Кратер Коперник на Луне

У лунных кратеров круглый вал сильно выдаётся, а, например, на Меркурии они более плоские. Причина в силе тяжести: на Луне она в 6 раз меньше, чем на Земле, а на Меркурии всего в два с небольшим раза. Поэтому на Меркурии сила тяжести выравнивает перепады высот.

На рис. 3.7а представлены стенки **кратера Аристарх** на Луне. Его глубина 3 км, а диаметр 40 км. В центре кратера почти всегда гора (рис. 3.7б) – **центральный пик**. Причина в том, что в момент взрыва из эпицентра вещество отбрасывается в стороны и



поднимается, а потом гравитация его частично возвращает на место, и оно отправляется к эпицентру. А в эпицентре импульс складывается и выдавливает вещество наверх.

Например, если бросить каплю воды в стакан, она сначала сделает на поверхности вмятину, а иногда над этим местом вылетает вторичная капелька, иногда даже выше, чем высота, с которой падала первоначальная капля. Этот эффект называется кумулятивным эффектом. Это концентрация импульса на небольшой площади.

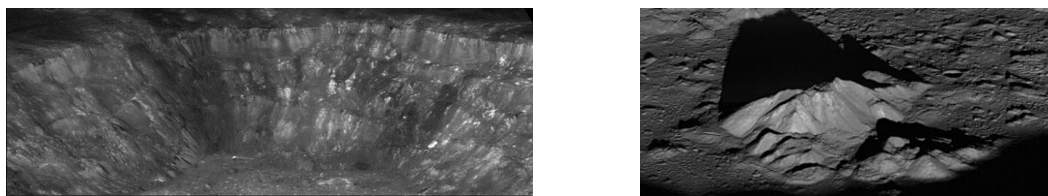


Рис. 3.7. (а) – стенки кратера Аристарх на Луне, (б) – центральный пик кратера Тихо

**Меркурий** изучен плохо. К нему летало всего два космических аппарата. «**Mariner 10**» в 1974–1975 пролетел, не останавливаясь, три раза, и не смог получить даже карту одного полушария (рис. 3.8а). Потом подлетел второй аппарат, уже вышедший на орбиту – «**Messenger**» в 2008, – и мы теперь имеет полную цветную карту Меркурия (рис. 3.8б).



Рис. 3.8. Карта полушария Меркурия, созданная «*Mariner 10*» (а) и «*Messenger*» (б)

Наверху справа видна большая площадка другого цвета – гигантская **долина Жары**, место удара очень крупного метеорита. На рис. 3.9а можно увидеть невысокие **кратеры Меркурия**.

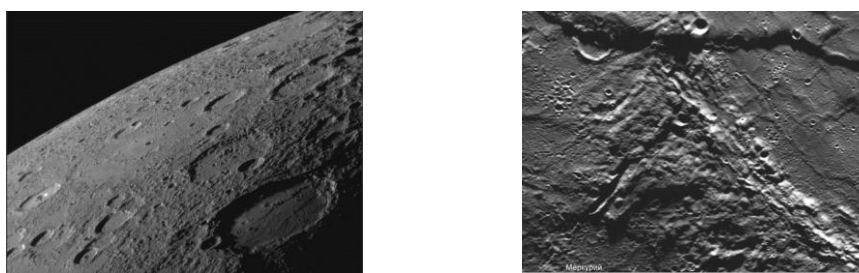


Рис. 3.9. (а) кратеры Меркурия, (б) эскарп на Меркурии

Поверхность Меркурия всё-таки отличается от поверхности Луны. На рис. 3.9б вверху проходит складка поверхности – **эскарп**. На Луне таких наплывов нет, а на Меркурии есть. Внутри что-то съёживалось, а поверхность напознала эскарпами сама на себя. Оказалось, что съёживалось железное ядро. У Луны оно совсем крохотное, а у

Меркурия занимает чуть больше половины объёма. У железа коэффициент термического сжатия и расширения очень большой.

**Поверхность Венеры** (рис. 3.10а) тоже исследована хорошо с помощью радиолокации. На ней есть метеоритные **кратеры**, довольно большие **горы** (самая высокая 11 км). У Венеры более активная тектоника, чем у Земли. А вот метеоритные кратеры только большие, потому что атмосфера тормозит маленькие астероиды и метеороиды и пропускает только такие, какие могут её пробить. Эффект тот же самый. Если в сечении поверхностная плотность камня больше поверхностной плотности атмосферы, он её пробивает.



Рис. 3.10. Кратеры на Венере (а), на Земле (б) и на Марсе (в)

К слову, самый большой земной кратер 300 км. Давление земной атмосферы 1 кг/см<sup>2</sup>. Если сжать атмосферу до плотности воды, слой будет толщиной 10 м. А если до плотности камня (3 г/см<sup>3</sup>), то примерно 3 м. Если летит метеорит размером 5 м, он пробьёт атмосферу и попадёт на поверхность планеты, если диаметр метеорита метр, атмосфера его затормозит.

Посчитаем **эквивалентный слой** на Венере. Она такого же размера как Земля и почти такой же массы, значит, сила тяжести там такая же, как на Земле. А давление воздуха у поверхности 92 атмосферы, то есть слой с плотностью камня будет высотой 300 м. Значит, метеорит размером 0,5 км и больше может пробить венерианскую атмосферу.

Есть такое соотношение: если радиус метеорита  $R$ , то кратер, который он оставляет, будет примерно  $20R$ . Это зависит от гравитации, но у Земли и Венеры она примерно одинаковая. Значит, на Венере будут кратеры размером 6 км и больше.

На **Земле** тоже есть метеоритные отметины, но их мало. На рис. 3.10б самый известный **кратер**. Он расположен в **Аризоне**, его диаметр 1 км и возраст 49 тыс. лет. Только 100 лет назад люди стали понимать, что это кратер, а не вулкан, когда стали находить в нём осколки железного метеорита.

Буквально на днях нашли ещё один такой же в Китае, диаметром 2 км. Возраст такой же. Это два самых молодых крупных кратера на поверхности Земли.

Диаметр метеорита, образовавшего аризонский кратер, был 50 м. Метеориты такого размера падают на Землю довольно часто, раз в 300–400 лет. Последний упал в 1908 г. в Сибири – **Тунгусский**. Он не долетел до Земли, шёл по пологой траектории, и

для него эффективная атмосфера растянулась, и в конце концов давление воздуха его раздробило.

Мы нашли всего два кратера такого размера, значит, большинство ещё не нашли, потому что большая часть метеоритов падает в океан, занимающий 2/3 поверхности Земли. А самые большие обнаруженные кратеры размером в 100–300 км возрастом от 100 до 200 млн лет. Более старых метеоритных кратеров не найдено. На Земле очень активная эрозия – разрушение верхнего слоя грунта под действием ветра, дождя и т. д.

На **Марсе** тоже много метеоритных **кратеров** (рис. 3.10в). Атмосфера менее плотная, но и кратеры большие, км и более, а маленьких ещё больше. Причина этого в том, что рядом пояс астероидов.

На рис. 3.11а представлена **топографическая карта Марса**. Голубым показаны низменности, а красным и особенно белым возвышенности. Слева на нижней карте изображена большая провинция Фарсида, где 3 вулкана высотой 22-23 км, а высота самого большого вулкана 25-26 км. Также на карте есть огромные низменности.

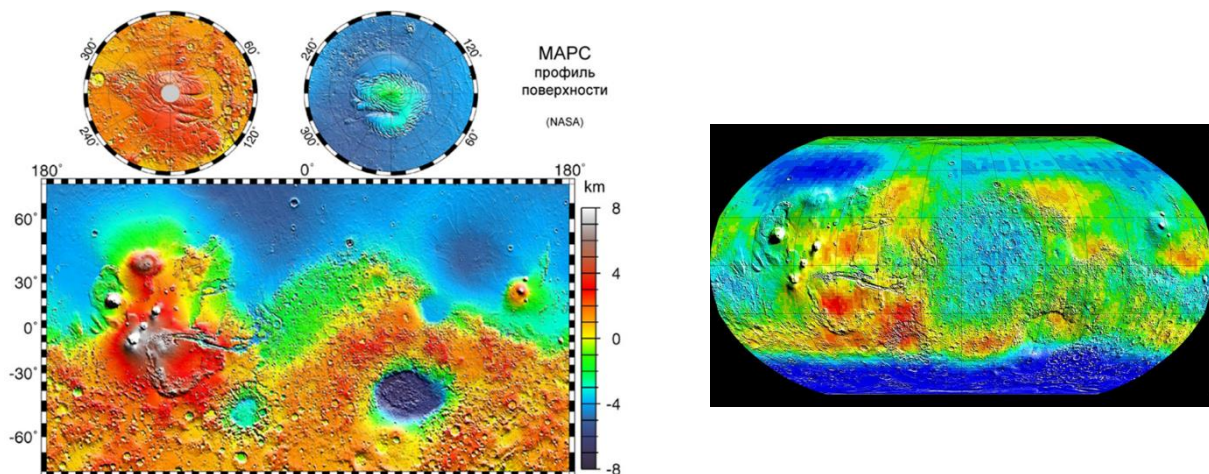


Рис. 3.11. Топографическая карта Марса (а) и карта, показывающая насыщенность грунта водой (б)

Но есть некая общая тенденция. Северная область практически до экватора низменная, а южная более возвышенная. На Луне асимметрия видимой и обратной стороны, а на Марсе южного и северного полушарий.

Также можно заметить, что возвышенная поверхность очень густо усеяна кратерами, а на низменной их почти нет. Это говорит о том, что она в геологическом смысле молодая, начала формироваться недавно, а до этого её что-то выравнивало. Это мог делать океан, и есть очень разумная гипотеза, что почти всё северное полушарие Марса было покрыто океаном, возможно, не таким глубоким, как на Земле. Средняя глубина земного океана 3,5 км, а на Марсе по расчётам было 300-400 м.

А вот карта Марса, представленная на рис. 3.11б, не топографическая. Здесь цветом показана **насыщенность грунта водой**. Марс – холодная планета, вода там не течёт, а лежит в виде льда. Он есть на севере, просто карта не дотянулась, на юге его

побольше. Южное полушарие Марса более континентальное, то есть перепады температуры там более значительные.

У Марса эллиптическая орбита, и когда в южном полушарии зима, он к тому же находится далеко от Солнца, поэтому там замёрзшей воды в грунте больше, а на севере меньше. Дальше от полюсов её почти нет. Если взять экваториальный пояс, то там будут два больших пятна льда в грунте на диаметрально противоположных сторонах планеты. Такое впечатление, что когда-то эти две области тоже были полярными, то есть Марс поменял ориентацию своей оси.

Но разве это может быть? Это же волчок, выполняется закон сохранения момента импульса. Он как крутится вокруг одной оси, так и будет крутиться, пока её никто со стороны не сдвинет. Однако карта намекает именно на это.

Есть **эффект Джанибекова**: вращение происходит в одном направлении, момент никуда не исчезает, а крутящийся объект перепрыгивает с одной ориентации относительно постоянной оси вращения в другую ориентацию. Это зависит от распределения момента импульса.

Планета вращается вокруг определённой оси, и вдруг в полярных широтах возникла выпуклость, например, вулканическая провинция, и центробежная сила стала смещать её в плоскость вращения. Так могла повлиять провинция Форсида. Ось вращения осталась прежней, а планета на оси находит себе наиболее устойчивую ориентацию (минимум энергии и угловой скорости вращения).

На рис. 3.12 представлен **геологический возраст поверхностей** некоторых **космических тел**. Меркурий имеет очень древнюю поверхность, а планеты с атмосферой не помнят, что их бомбардировало 4 млрд лет назад, на их поверхности всё выглаживается. А у Марса одни места древние (южное полушарие), а другие выглажены, видимо, водой (северное).

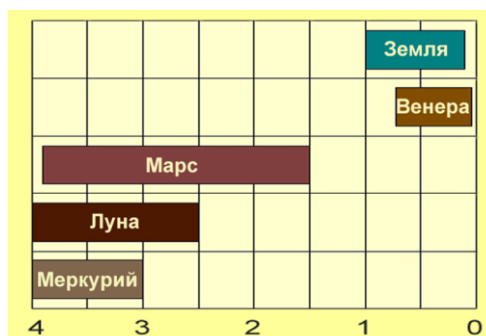


Рис. 3.12. Геологический возраст поверхностей планет

Есть тела, которые вообще ничего не помнят. Самая молодая в Солнечной системе в геологическом смысле **поверхность** у спутника **Юпитера Ио** (рис. 3.13а). У него активно действуют вулканы.

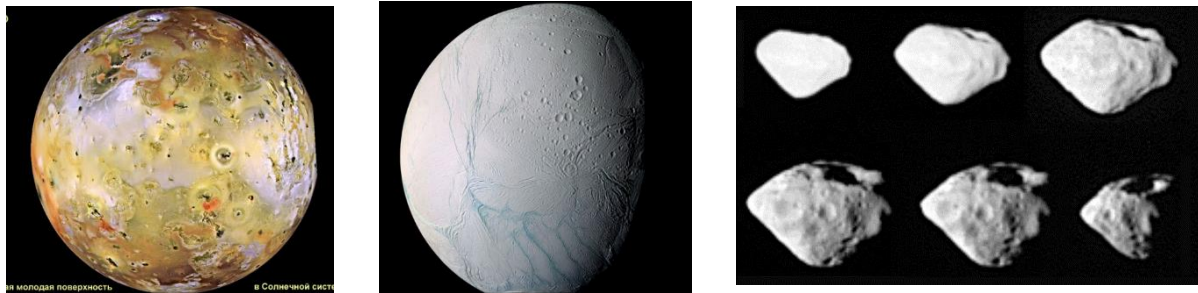


Рис. 3.13. (а) спутник Юпитера Ио, (б) спутник Сатурна Энцелад, в) фотографии астероида Steins при пролёте мимо него

На картинке видно, как из жерла вулкана вытекает лава. Она чёрная, потому что при высокой температуре вещества, содержащие серу и её соединения, чернеют. Каждая тёмная точка – действующий или потухший вулкан. На поверхности Ио сложно найти хотя бы один метеоритный кратер. Очевидно, что метеориты туда падают, потому что Ио находится на другой границе пояса астероидов (система Юпитера), но всё довольно быстро выглаживается, вулканические выбросы всё покрывают.

На рис. 3.13б показан спутник Сатурна Энцелад. Его экватор проходит горизонтально через центр планеты. В северном полушарии есть метеоритные кратеры, и их много, а в южном ни одного. Там можно увидеть фиолетовые полосы – трещины во льду, из них постоянно бьют водяные гейзеры, подо льдом большая область жидкой воды. Вода взлетает, частично улетает в космос, вдоль орбиты Энцелада даже есть кольцо снежинок, но в основном она падает обратно, поэтому южное полушарие покрыто свежим снегом и льдом. Оно молодое в геологическом смысле, а в северном накопились кратеры за долгое время.

Иногда соударения астероидов друг с другом приводят к полному дроблению их в пыль, а иногда к частичному взламыванию. Есть интересный астероид Steins (рис. 3.13в) диаметром 5 км. «Rosetta» пролетал мимо него и сфотографировал. Самый близкий момент пролёта на нижнем центральном изображении, там видно огромный метеоритный кратер размером в половину самого метеорита. Под ним видна ещё цепочка мелких кратеров, которые направлены на большой. На правом нижнем изображении видно, что цепочка продолжается в другую сторону. Такие кратеры называются вторичными. На самом деле это провалы. Удар большого тела расколол этот астероид на две части, тот треснул, но гравитация вернула на место две половинки. Однако трещина осталась, и вещество туда ссыпалось.

### Объекты и явления в атмосфере Земли

Соударения астероидов приводят к тому, что часть их вещества просто выбрасывается в пространство и как пыль летает по Солнечной системе. Этим объясняется происхождение такого явления как зодиакальный свет (рис. 3.14а). Перед восходом или послед захода Солнца есть световой конус вдоль направления эклиптики.

На современных фотографиях это явление тоже видно. Это и есть та самая мелкая пыль, и она хорошо воспроизводится. Вспомним **эффект Пойнтинга-Робертсона**: давление света на движущийся объект направлено не радиально от источника света, за счёт сложения скоростей происходит поворот направления давления. Оно всегда тормозит частицы, и они всегда приближаются к источнику света. Эта пыль за несколько тысяч лет вся падает на Солнце и там плавится. Но она есть, значит, воспроизводится.

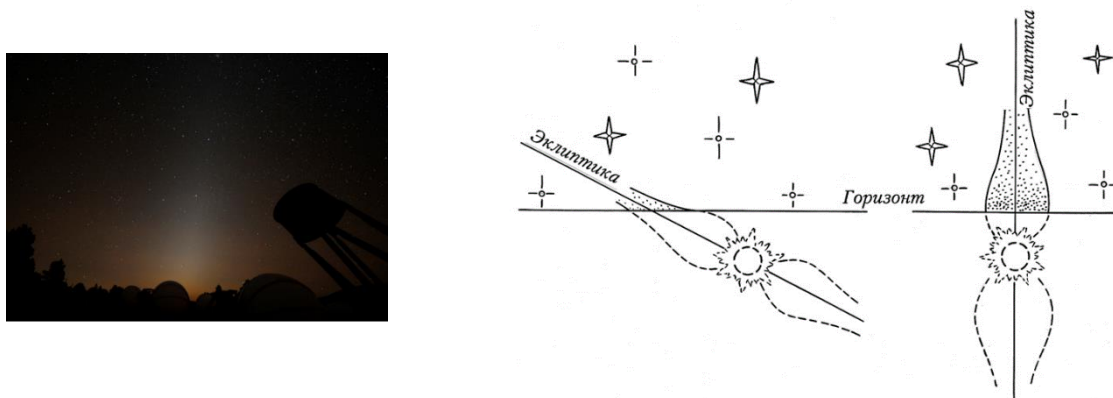


Рис. 3.14. а) зодиакальный свет, б) эклиптика в средних широтах и на экваторе

Поймём, почему зодиакальный свет можно увидеть только в экваториальных странах. В наших широтах эклиптика расположена под небольшим углом к горизонту (рис. 3.14б, слева), и когда Солнце на большой глубине (а это надо, чтобы небо потемнело), верхняя область эклиптики уже под горизонтом или очень низко.

А на экваторе (рис. 3.14б, справа) Солнце садится перпендикулярно горизонту. Оно опускается на нужную глубину – на 18 градусов, – чтобы наступили астрономические сумерки, и верхняя часть эклиптики ещё над горизонтом.

На Землю падают **метеориты**. В основном они разрушаются в верхних слоях атмосферы. Астрономы радуются, когда мелкие метеориты сгорают на высоте примерно 90 км, потому что они обогащают атмосферу Земли натрием, который входит в их состав. Натрий на такой высоте нужен для адаптивной оптики. Лазер смотрит в стратосферу, на высоте примерно 90 км упирается в слой, обогащённый распылённым метеоритным веществом, поглощается, и там получается яркое пятнышко (рис. 3.15а), если лазер настроен на жёлтые линии натрия.



Рис. 3.15. а) луч лазера в стратосфере, б) болид, в) динамическое давление среды на движущийся объект

Яркие метеориты мы называем **болидами** (рис. 3.15б). Общепринятого определения болида нет. В англоязычной литературе написано, что болид – это вспышка, превосходящая по яркости полную Луну. У Луны звёздная величина минус 12 – минус 13. А в русскоязычной литературе пишем, что болид – метеор, который ярче Венеры. У Венеры яркость минус 5 – минус 13.

Когда твёрдое тело влетает в атмосферу Земли, на него происходит давление воздуха (рис. 3.15в).  $\rho V^2$  – **динамическое давление** любой среды на движущийся объект.  $\rho$  на высотах 90 км небольшое, но небесный объект может влететь в атмосферу Земли с максимальной скоростью, если летит навстречу орбитальному движению Земли и по параболической орбите, чтобы в перигентре этой орбиты иметь свою вторую космическую скорость по отношению к Солнцу. Вторая космическая скорость по отношению к Земле 11 км/с, а там складываются квадраты скоростей, и она значения не имеет. Значит, берём от 11 до 72 км/с. В среднем примерно 50 км/с, то есть даже разреженный воздух оказывает огромное давление на метеориты. Каменные метеориты обычно дробятся, железные более прочные и иногда падают на поверхность.

**Кометы теряют вещество** в виде газа и в виде минеральных частиц, когда кора кометы взламывается. И постепенно любая комета заполняет область своей орбиты этим потерянным минеральным веществом, мелкими твёрдыми частицами (рис. 3.16). Если земная орбита пересекает орбиту кометы в одном или двух местах (как для кометы Галлея, весной и осенью), каждый раз попадает в область Солнечной системы, насыщенную мелким пылеобразным веществом. Соответственно, на Землю падает больше таких частиц, и мы видим метеорные дожди.

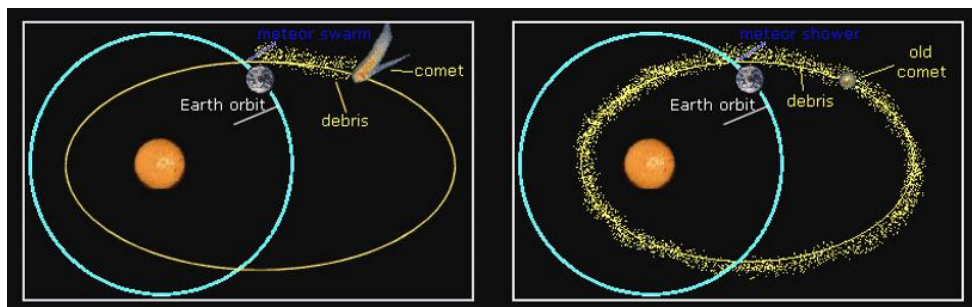


Рис. 3.16. а) потерянное вещество кометы на её орбите

Они именно метеорные, а не метеоритные. **Метеорит** – то, что мы находим на Земле, а **метеор** – то, что сверкнуло и разрушилось наверху, то есть очень мелкая частица. На рис. 3.17а мы видим метеор с огромного расстояния на высоте 90 км и ещё под углом, значит, примерно на расстоянии 150 км мы видим яркую вспышку. Размер частицы, влетевшей в атмосферу, примерно миллиметр, но такая вспышка из-за того, что у неё огромная кинетическая энергия, поэтому большая часть превращается в свет.

Когда мы смотрим в апекс, то есть в то направление, откуда они летят, наш взгляд направлен параллельно потокам этих частиц. То, что они потом разлетаются в разные стороны, просто эффект перспективы, и можно примерно угадать их орбиту.



Рис. 3.17. (а) радиант метеоритного потока, (б) болид, запечатлённый в 2003 г. в Южном Уэльсе, (в) Челябинский метеорит, 2013 г.

Большие камни долетают до поверхности Земли и падают на неё, иногда это даже удаётся снять. На рис. 3.17б показан болид, запечатлённый в 2003 г. в Южном Уэльсе, а на рис. 3.17в самый изученный болид, упавший вблизи **Челябинска** 15 февраля 2013 года.

На рис. 3.18 на **карту** нанесены места, где были найдены **крупные метеоритные кратеры**. На дне океана их тоже уже найдено несколько штук, самые большие. Самые крупные кратеры мы находим на юге Африки и на севере Евразии. Кратеры распределены неоднородно. Возможно, это связано с тем, что в густонаселённых регионах, где развита наука, их активнее ищут. А также с природой: например, в Амазонке на аэроснимках ничего не видно кроме леса.

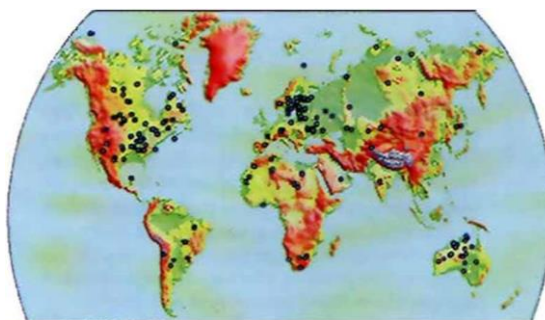


Рис. 3.18. Карта метеоритных кратеров на Земле

В 1947 г. на Дальнем Востоке упал метеорит на **Сихотэ-Алинский хребет**. В нём было примерно 95% железа, 5% никеля и немного других элементов. Такая пропорция – почти точный рецепт нержавеющей стали.

На рис. 3.19а показано, как выглядят кусочки метеоритного железа. Вдавленные места называются регмаглипты. Метеорит летит в атмосфере, есть турбулентные потоки, и горячий воздух давлением выплавляет эти места.

В 1908 г. упал **Тунгусский метеорит** (рис. 3.19б), хотя то, что это именно метеорит, утверждать сложно. Взрыв в атмосфере был на высоте несколько километров, мощный пожар тоже был, деревья положило, а метеоритного вещества не нашли. Можно сделать вывод, что тело состояло, скорее всего, из водяного льда, то есть это было ядро



кометы, которое взорвалось в атмосфере. Оно начало дробиться от давления атмосферного воздуха, площадь поверхности конгломерата мелких частиц увеличилась, оно резко затормозилось в атмосфере, выделилось тепло. Учёные впервые приехали на это место только в 1930 г., и за четверть века вся эта жидкость растворилась в болотах.



Рис. 3.19. а) кусочек метеоритного железа, б) место падения Тунгусского метеорита  
**На Марсе** часто находят железные и каменные метеориты (рис. 3.20а).

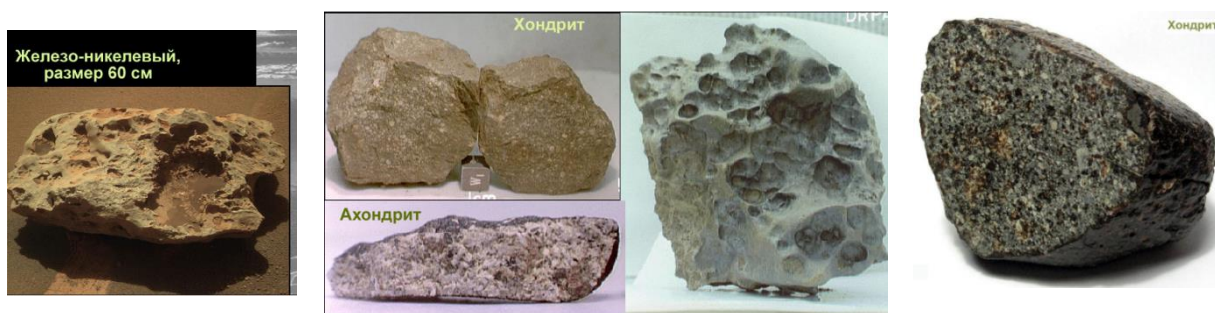


Рис. 3.20. а) железо-никелевый метеорит, б) железные и каменные метеориты, (в) метеорит внутри и снаружи

Пока в коллекциях только **два типа метеоритов**: железные (железно-никелевые) и каменные (рис. 3.20б). И те, и другие можно разделить на много сортов. На поверхности метеорита обычно оплавленное вещество, но, если разрезать его, можно увидеть первозданное вещество (рис. 3.20в).

А бывают очень **редкие метеориты**. Например, метеорит на рис. 3.21а имеет такое высокое альbedo, какое мы наблюдаем только у одного астероида в большом поясе астероидов – у **Весты**. И именно у Весты на юге огромный кратер, выбито большое количество вещества, и теперь каждый пятый метеорит, который мы находим на Земле, её осколок.

А метеорит с рис. 3.21б нашли в Африке. По дистанционным измерениям его состав очень близок к составу **Фобоса** – спутника Марса.

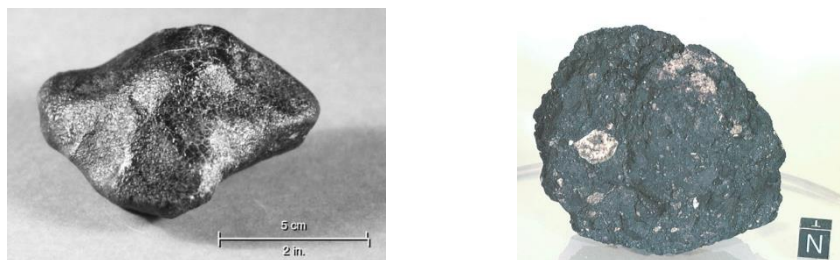


Рис. 3.21. (а) метеорит с астероида Веста, (б) метеорит со спутника Марса Фобоса

Метеорит с рис. 3.22а – кусочек **Марса**. Это определили по минеральному составу и по тому, что на разрезе есть полости, и, если из них аккуратно изъять образец газа и сделать его изотопный состав (аргона, ксенона), он будет точно соответствовать изотопному составу марсианской атмосферы. На Земле уже нашли более полусотни марсианских метеоритов, но данный самый интересный. Его нашли в Антарктиде в 1984 г.

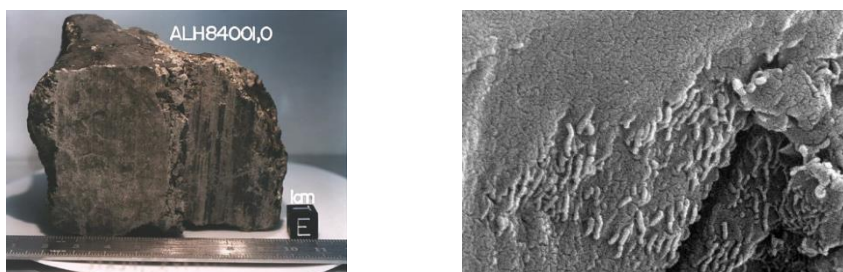


Рис. 3.22. (а) – метеорит с Марса, (б) – белые образования на нём

Под электронным микроскопом (рис. 3.22б) оказалось, что там есть белые образования. Сначала была гипотеза, что это окаменевшие бактерии, но сейчас у неё всё меньше сторонников. Длина образований очень маленькая (20–30 нм), у нас таких бактерий нет, но вирусы есть.

Для астрономов очень важно охранять Землю от космических угроз, а для этого надо научиться **предвидеть падение на Землю** всяких космических тел. На рис. 3.23а снимок, где в течение не очень длительной экспозиции тело так быстро двигалось, что вытягивалось на негативе в линию, значит, оно уже близко к Земле. Посчитали траекторию, и оказалось, что оно через несколько часов упадёт на Землю. Так и произошло, оно упало в Африке ночью, утром нашли свежие осколки метеорита. Был ещё один такой случай, но метеорит там упал в океан, и мы ничего не нашли.



Рис. 3.23. (а) движение метеорита на снимке, (б) метеорит Гоба

На рис. 3.23б можно увидеть самый большой метеорит, найденный на Земле. Это метеорит **Гоба**, он железный, тоже упал в Африке. Его масса 60 тонн.

Падение больших метеоритов – крупная катастрофа для Земли. Такие события даже могут лишиться планету части или всей атмосферы. Мы уже рассматривали рис. 3.24. При большой силе тяжести атмосфера держится у планеты, а при малой силе тяжести и мощном ударе её сносит. Соответственно, у малых тел **метеориты сносят часть атмосферы**, а у больших **застревают** в ней.

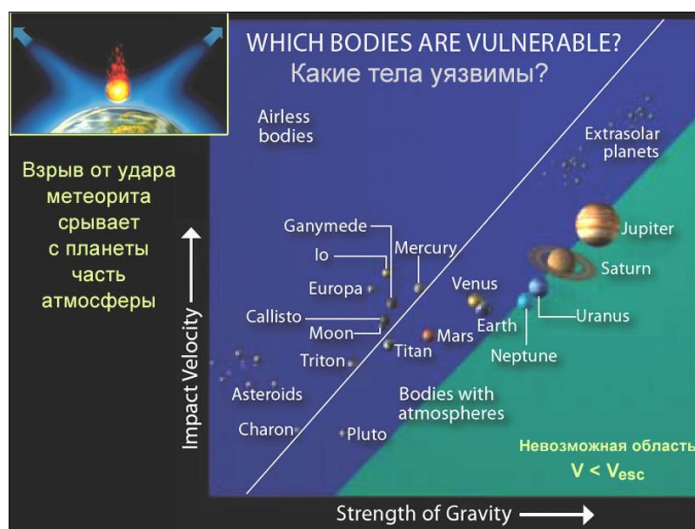


Рис. 3.24. Космические тела, способные и не способные удерживать атмосферу

### Внешний вид и строение атмосферы космических тел

Внешность планеты зависит в первую очередь от того, есть **атмосфера** или нет. **Безатмосферное тело темнее**, чем тело с присутствием атмосферы.

Коэффициент отражения солнечного света от поверхности планеты обычно обозначается числом, чем бы эта поверхность не являлась – твёрдой или облачной поверхностью атмосферы. Мы в целом смотрим на планету и говорим, что у неё определённое **альbedo**: 1 – весь свет отражается, 0 – ничего не отражается (рис. 3.25а).

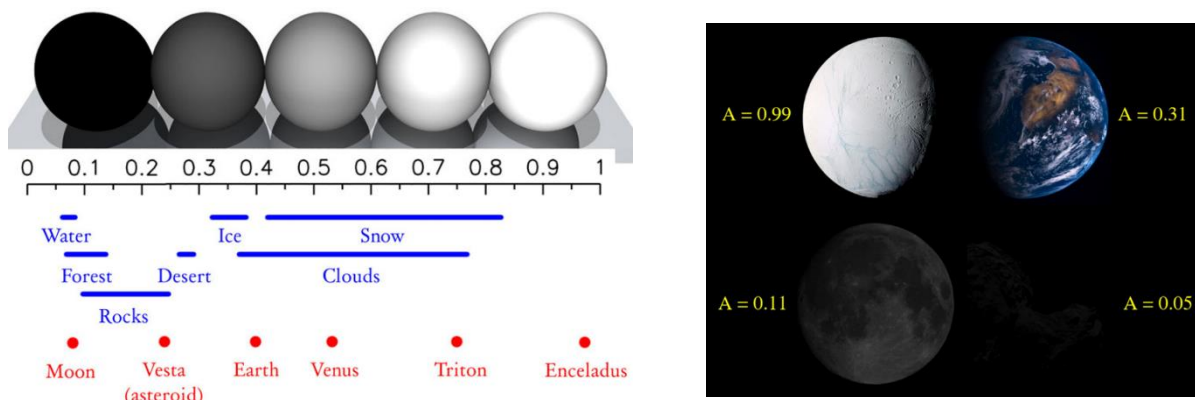


Рис. 3.25. а) альbedo разных поверхностей и небесных тел, б) сравнение альbedo Энцелада, Земли, Луны и ядра кометы Чурюмова-Герасименко

Внизу изображены знакомые поверхности и **средние альбедо** небесных тел. Луна – одно из самых чёрных тел, хотя ещё чернее бывают астероиды. А Энцелад – одно из самых светлых, потому что у него постоянно обновляется поверхность, выбрасываются водяные гейзеры, засыпают всё свежим снегом.

На рис. 3.25б изображены 4 объекта. У **Земли** альбедо 31% за счёт облаков, у **Энцелада** почти 1, **Луна** отражает только 11% света. На четвёртой фотографии **ядро кометы Чурюмова-Герасименко**, альбедо 5%.

Альбедо и внешний вид планеты зависит от того, в каком **диапазоне** мы на неё смотрим. В оптическом диапазоне полупрозрачная атмосфера (рис. 3.26а): где-то она непрозрачная, а где-то мы видим твёрдую поверхность.



Рис. 3.26. (а) – Земля в оптическом диапазоне, (б) – в инфракрасном

Смотрим на Землю в инфракрасном диапазоне излучения (рис. 3.26б). Пары воды вообще не пропускают излучение в этом диапазоне, с поверхности к нам ничего не приходит.

Поговорим о **движении газа в атмосфере**. Атмосфера течёт оттуда, где давление больше, то есть оттуда, где она нагрета (от экватора), туда, где оно меньше (к полюсам). Но при этом ещё надо учесть вращение планеты. За счёт этого сила Кориолиса начинает заворачивать то, что от экватора движется к полюсам, в виде **циклонических образований** (рис. 3.27а). Учитывая скорость вращения **Земли**, можно рассчитать, что размер таких циклонов 1–1,5 тыс. км. Где бы мы ни взяли снимок Земли из космоса, мы увидим эти циклоны.



Рис. 3.27. Циклоны на Земле (а), Юпитере и Венере (б)

А если планета медленно вращается, сила Кориолиса слабая и не может быстро завернуть атмосферный поток в компактный циклон. На быстро вращающемся **Юпитере**

циклоны мелкие и их много, а на медленно вращающейся **Венере** их всего два, они накручиваются от экватора на полюса, каждый размером с саму планету (рис. 3.27б).

Рассмотрим, куда движется вещество, когда достигает полюса. Оно там остывает, опускается вниз и в нижних слоях атмосферы возвращается к экватору, там опять нагревается, и так происходит циркуляция. Посмотрели на **Венеру** со стороны полюса (рис. 3.28а). Это два снимка: в оптике мы видим дневное полушарие, в инфракрасном диапазоне ночное, и можно проследить за большим циклоном.

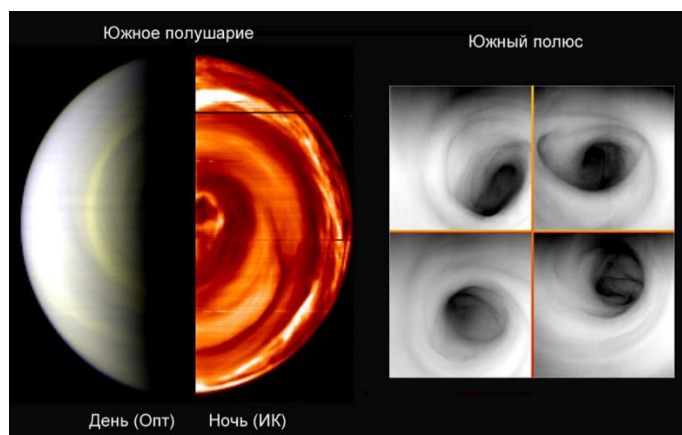


Рис. 3.28. Циркуляция вещества в атмосфере Венеры

**Строение атмосферы** практически у любой планеты, имеющей её, одинаковое. Атмосфера полупрозрачная, свет проходит через неё к поверхности Земли (рис. 3.29а), и это является источником тепла. После контакта с тёплой поверхностью воздух начинает подниматься, адиабатически расширяется, так как давление внизу больше, охлаждается.

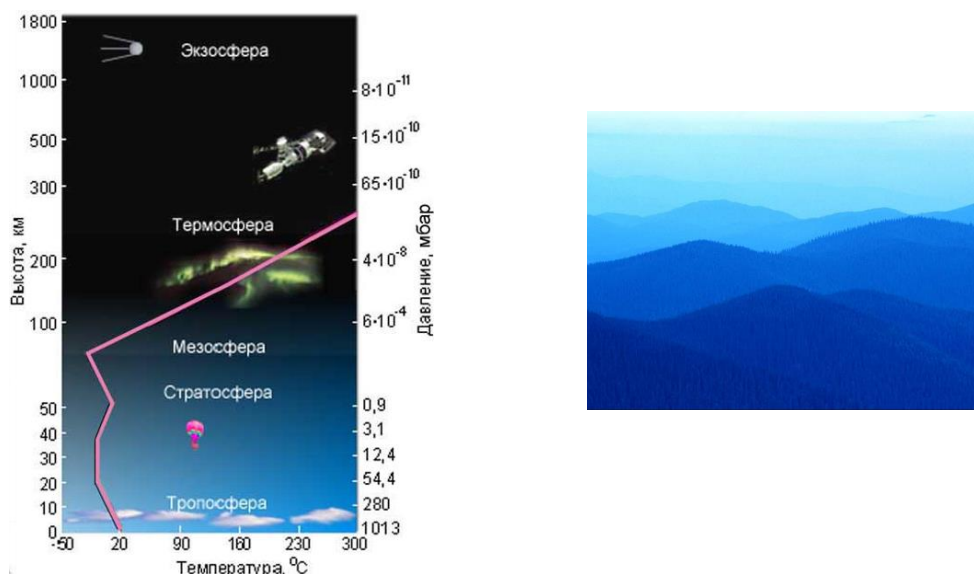


Рис. 3.29. а) температура и давление в зависимости от высоты в земной атмосфере, б) вид объектов через толщу атмосферы

А потом на высоте 20 км начинаются зигзаги, потому что есть слои атмосферы, которые могут задержать то или иное излучение. Например, ультрафиолетовое задерживается примерно на высоте 40-50 км озоном. Тут как бы следующий слой источник тепла, потом снова адиабатическое расширение. Выше 80 км повышение температуры формальное. Просто быстрые атомы свободно улетают из атмосферы, чем быстрее атом, тем выше он подпрыгивает.

**Давление** падает экспоненциально с высотой (барометрическая формула:  $P = P_0 e^{-\frac{H}{H_0}}$ ). А вот температура и плотность немного меняются, но в сумме поддерживают такое простое поведение атмосферного давления.

Рассмотрим понятие «**высота однородной атмосферы**». Если мы сожмём всю атмосферу до плотности, характерной для её основания, то атмосфера станет толщиной 8 км. Это можно интерпретировать по-другому: давление падает в  $e$  раз на каждые 7,5 – 8 км в атмосфере.

**Плотность воздуха** у поверхности любой планеты максимальна. Если мы удаляем объект на 8 км вдоль поверхности Земли, это примерно то же самое, как если бы мы смотрели на него через полный слой атмосферы (рис. 3.29б). Когда мы видим какой-то объект у горизонта, до него толщина воздушного слоя примерно в 40 раз больше, чем если смотрим в зенит. Даже на Земле у горизонта почти ничего не видно, а тем более в космосе.

Наблюдающие астрономы хорошо знакомы с метеорологией и **типами облаков**, потому что они являются **помехой** для наблюдения (рис. 3.30). Если кучевые облака, то на небе не видно вообще ничего, а вот полупрозрачные облака довольно опасны. Ночью их вообще не видно, и у них зачастую периодическая структура, всё это плывёт перед объективом телескопа и вызывает периодическое изменение яркости среды, и астроном думает, что она реально мигает.

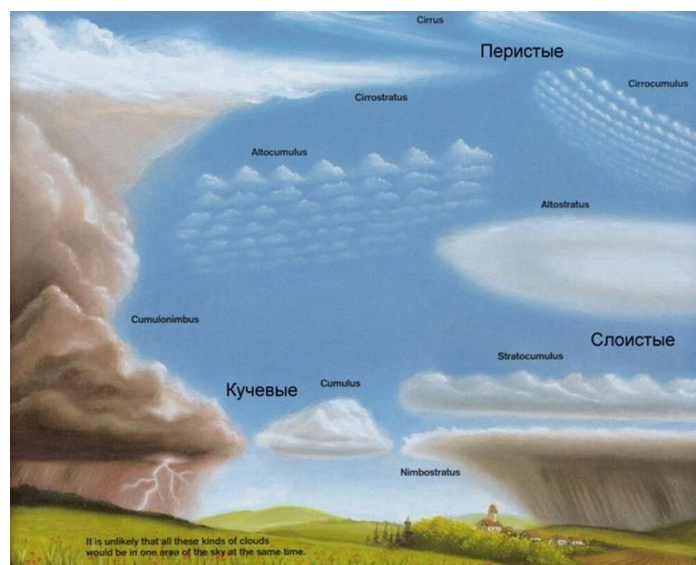


Рис. 3.30. Типы облаков в атмосфере Земли

Чтобы решить эту проблему, придумали двухлучевые телескопы-фотометры, которые смотрят одновременно на две звезды, и, если они обе синхронно или с каким-то сдвигом меняют яркость, очевидно, что перед ними плывёт полупрозрачная облачная структура, и надо это учитывать.

**Серебристые облака** – не вполне изученная структура (рис. 3.31а). В конце июня или в начале июля в районе полуночи их часто можно увидеть на севере, но не каждый год. Они на большой высоте и видны в полночь потому, что в дни летнего солнцестояния Солнце неглубоко уходит под горизонт и может подсветить атмосферу на высоте 80–90 км, то есть ту, где вспыхивают метеоры, а значит сгорают микрометеориты, то где слой обогащён твёрдыми частицами. Есть гипотеза, что именно они являются причиной появления серебристых облаков.

В тёмных областях на небе на фотографии эти облака тоже есть, но их не видно, т. к. Солнце освещает заревый сегмент, а за пределами яркой картинке солнечные лучи поднимаются в космос на большие высоты. А если бы Солнце опустилось ещё глубже под горизонт, мы бы не увидели на этом сегменте неба ничего.

Коэффициент поглощения таких облаков 1–2%, через них видно звёзды и даже планеты. Человеческий глаз это не замечает, а фотометр замечает.



Рис. 3.31. а) серебристые облака, б) полярное сияние на снимке кометы

**Полярное сияние** происходит на ещё больших высотах. Оно не нуждается в солнечном излучении, само источник света, поэтому его мы видим в любое время года, даже желательно, чтобы Солнце было под горизонтом. Они тянутся до высот 600–650 км. Кстати, на высоте 430 км летает МКС, а «Хаббл» на высоте 600 км.

Это красиво, но астрономам мешает. Например, на рис. 3.31б хотели изучить комету (она видна над вершинами деревьев), но из-за полярного сияния ещё надо разобраться, какие линии в спектре кометы принадлежат её хвосту, а какие нашей атмосфере.

В этом разбираются по доплеровскому смещению. Оно равно 0 для нашей атмосферы, а комета летит, её линии сдвинуты.

### Атмосфера и поверхность других планет

В атмосферы других планет зонды тоже бросали. Американский аппарат привёз и выбросил в атмосферу **Венеры** сразу 4 зонда. Один пошёл на ночное полушарие,

другой на дневное, третий в область экватора, четвёртый в средние широты, и они одновременно в четырёх точках измерили параметры атмосферы.

Ну а мы сажали на **поверхность** Венеры зонды, и это единственное в истории прикосновение к её поверхности. В 1980-е годы было получено много интересных результатов. Например, тогда были получены панорамы, которые потом немного перемонтировали, чтобы на них проще было что-то различить (рис. 3.32а)



Рис. 3.32. а) фотография поверхности Венеры, сделанная аппаратом Венера-13, б) цветной снимок поверхности Венеры через её атмосферу

Поверхность вулканическая, базальтовая, оранжево-красного цвета (рис. 3.32б). Но если у Марса она такая, потому что там много оксида железа, то у Венеры потому, что атмосфера ничего кроме красного цвета не пропускает.

Полностью изучить топографию Венеры можно было только с помощью радиолокаторов. Первые **радиолокационные карты Венеры** были наши. «Венера-15 и 16» подлетели и просканировали примерно треть её поверхности (рис. 3.33а).

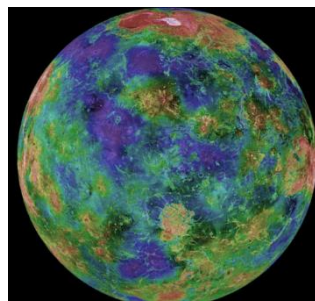
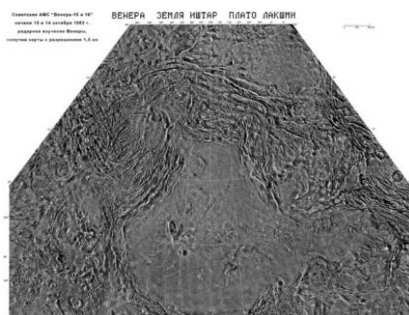


Рис. 3.33. (а) первая радиолокационная карта Венеры, (б) полная карта

Восстановить изображение из радиолокационных отражённых сигналов очень сложно. Это некорректная обратная задача. Но всё-таки мы получили **полные карты Венеры** (рис. 3.33б). На них цветом показана высота: голубой – низменности, зелёно-жёлтый – возвышенности, красный и особенно белый – максимально высокие области, горные провинции, в центре которых гора высотой 11 км. Эту вершину назвали в честь человека, создавшего теорию радиоволн – Дж. Максвелла.

Лучшие карты Венеры (рис. 3.34а) созданы в ГАИШ в отделе Луны и планет.



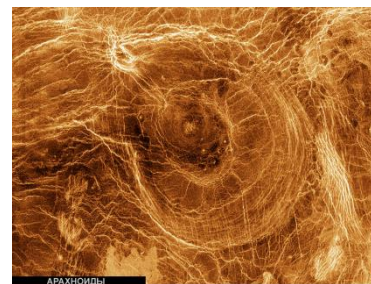
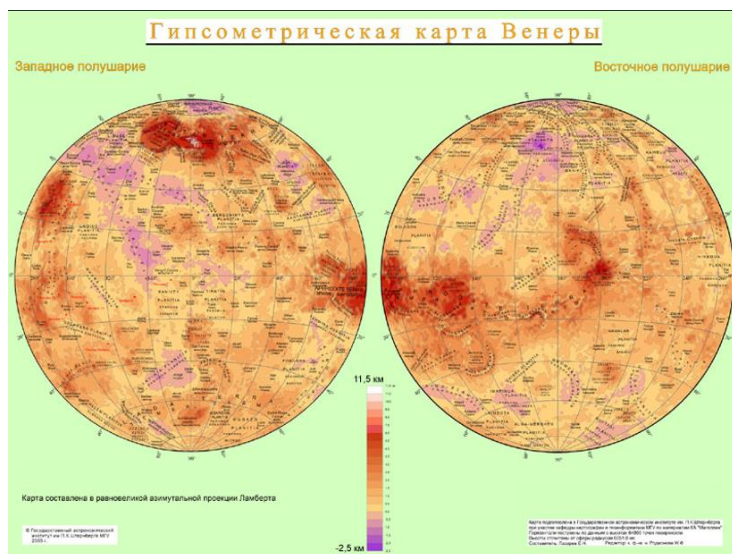


Рис. 3.34. а) карты Венеры, сделанные в ГАИШ, б) арахноиды на Венере

На Венере много образований, которые мы не встречали на Земле. Например, надутые пузыри на твёрдой поверхности – **арахноиды** (рис. 3.34б). Скорее всего, это особенности горячей поверхности. У нас вулканы должны пробить холодную кору Земли и для этого должны бить в одну точку как кумулятивный снаряд. А у Венеры даже верхняя часть твёрдой поверхности имеет температуру 500 градусов, она полурасплавленная, поэтому лава выдавливает большие области из полумягкой коры.

На рис. 3.35а показана **самая большая гора Марса** – Олимп. По совместительству она самая высокая гора в Солнечной системе, видимо, бывший вулкан. В поперечнике он 500 с лишним км. Раньше думали, что он потух, но сейчас появляются сведения, что потихоньку бурлит и, возможно, когда-нибудь сработает.



Рис. 3.35. а) гора Олимп на Марсе, б) слева карты Марса, справа его фотографии, сделанные «Хабблом»

На рис. 3.35б слева **карта двух полушарий Марса** середины 20 века, а справа фотография телескопа «Хаббл» конца 20 века. На картах слева есть тёмная сетка линий, полученная астрономами, разглядывавшими поверхность Марса в телескоп, а справа её

нет. Говорят, что это иллюзия человеческого зрения, но карты этих линий повторяются у разных астрономов.

**Полярные шапки** на Марсе (рис. 3.36а) частично состоят из воды, а частично из замёрзшей **атмосферы**, которая состоит почти на 100% из углекислого газа, как и атмосфера Венеры. А углекислый газ при температуре ненамного ниже 100 °С (там 140–150 °С) застывает и снегом падает на поверхность полярных областей. Когда наступает лето, внешняя часть полярной шапки довольно быстро оттаивает, то есть происходит возгонка: углекислый газ становится газом и улетает в атмосферу. Давление атмосферы в этом месте повышается, и она начинает дрейфовать к другому полушарию, где в это время зима и где ей полагается застыть. Так каждый сезон половина марсианской атмосферы летает из одного полушария в другое. Естественно, там сильный ветер, пыль поднимается, и часто бывают пылевые бури.

А вот центральная шапка остаётся даже в конце лета, потому что это вода, а температуры всё равно отрицательные по цельсию.



Рис. 3.36. (а) – полярные шапки на Марсе, (б) – облака в его атмосфере

В атмосфере Марса бывают **облака** (рис. 3.36б). Они состоят из обычных кристалликов воды. Но атмосфера разрежена и воды в ней очень мало.

Существуют очень хорошие **карты Марса** (рис. 3.37).

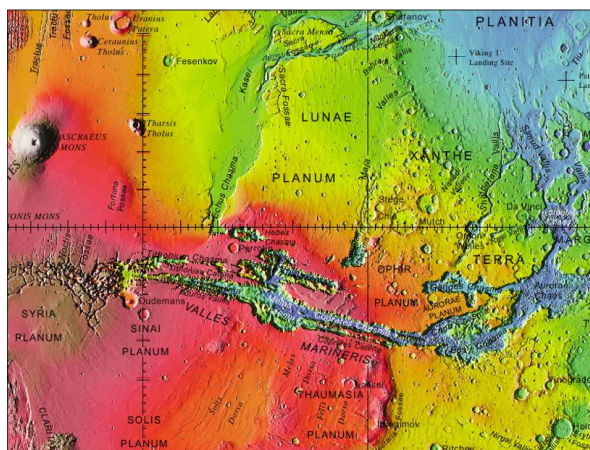


Рис. 3.37. Карта Марса

На поверхности Марса есть интересные образования. На рис. 3.38а видны **русла рек**: притоки, главное русло, меандр.

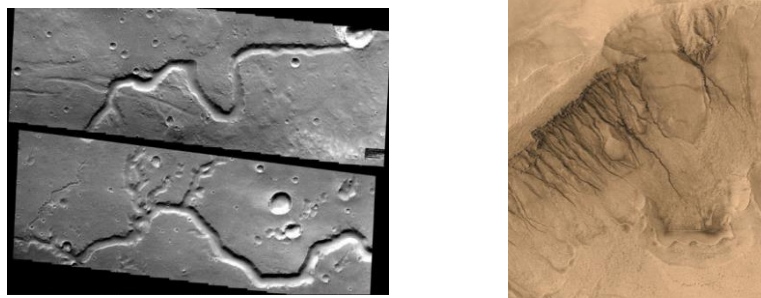


Рис. 3.38. (а) русла рек (а) и ручейки (б) на Марсе

Весной на поверхности Марса иногда видно что-то, похожее на **ручейки** (рис. 3.38б). Такое впечатление, что слой вечной мерзлоты оттаивает под солнечными лучами, что-то течёт и почти исчезает. Причина последнего в низком атмосферном давлении, которое почти в 160 раз меньше, чем на Земле. При таком давлении жидкой воды вообще не может быть, у неё в таких условиях есть только агрегатные состояния лёд и пар. Если на поверхность Марса выплеснуть ведро воды, какое-то время она будет жидкой, потом начнёт испаряться и уносить тепло, а оставшаяся часть замёрзнет.

Но в нижней части фотографии мы видим ровную поверхность, словно что-то туда всё же дотекло и там замёрзло в виде катка. Также можно увидеть бортик с двух сторон этой поверхности. Сначала это удивило астрономов, но потом выяснилось, что такие бортики могут вырастать сами: где переливается тонкий слой воды, там происходит кристаллизация. Марсианская вода скорее всего застывает, но может и кристаллизоваться, так как в ней много солей.

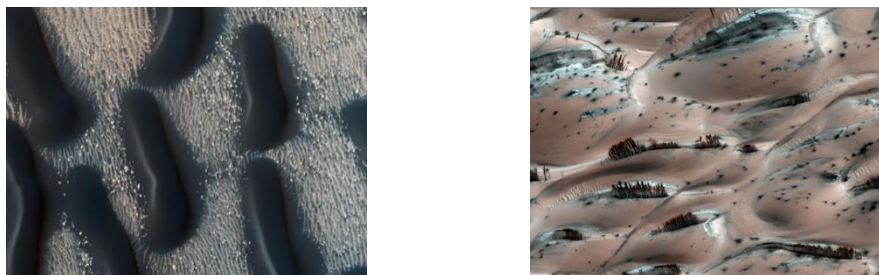
На рис. 3.39а слева представлена марсианская **тундра**, а справа земная. И там, и там видны **полигональные структуры**, более-менее шестиугольные. Оказывается, что это результат отмораживания и замораживания грунта, в котором много воды. Когда летом Солнце прогревает, они отмораживаются, а зимой вновь превращаются в лёд. А лёд имеет больший объём, чем вода, он расширяется, и получается неустойчивость: верхний слой камней собирается в промежутках между ледяными линзами.



Рис. 3.39. а) сравнение марсианской и земной тундры, б) сравнение поверхностного слоя и дюн на Марсе и на Земле

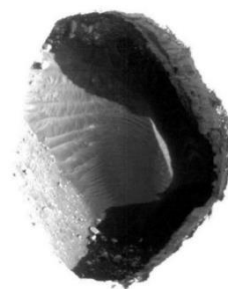
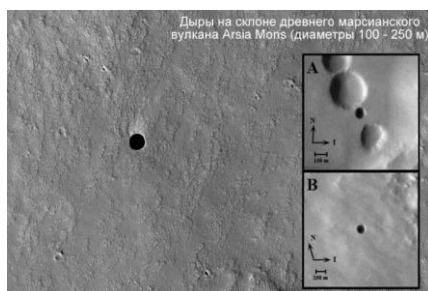
Ещё для сравнения Марса и Земли на рис. 3.39б представлен **поверхностный слой** (верхние картинки) и **дюны** (нижние). Левые фотографии сняты на Марсе, правые на Земле.

На Марсе есть **образования**, которые учёные не могут объяснить (рис. 3.40).



*Рис. 3.40. Необъяснимые марсианские образования*

Также на Марсе есть **пещеры** (рис. 3.41а). Это замечательная перспектива для поиска жизни. На поверхности её не может быть, потому что атмосфера разрежена, и космические лучи всё стерилизуют. Но она может существовать в глубоких провалах в поверхности. С орбиты не видно, куда они ведут, но ясно, что дно поворачивает в сторону (рис. 3.41б).



*Рис. 3.41. (а) пещера на Марсе, (б) поворот дна такой пещеры*

## Лекция 4. Строение и эволюция планет

### Внутреннее строение планет

На рис. 4.1а вид планет Солнечной системы кажется необычным, потому что у Сатурна нет кольца. Но на самом деле кольца не имеют никакого отношения к планете, это то, что происходит вокруг.

На картинке есть лишний Плутон. Ещё отметим, что **разрыв в массе и размере** между гигантами и планетами земной группы большой, но так только в Солнечной системе. Во многих других планетных системах этого разрыва нет. Можно предположить, что это особенность эволюции нашей системы.



Рис. 4.1. (а) – планеты Солнечной системы, (б) – планеты земной группы и Луна

На рис. 4.1б представлены **планеты земной группы**, но ещё добавлена **Луна**. А вот здесь **нет разрыва**, масса и размер спадают монотонно, и мы плавно переходим к спутникам, которые являются таковыми только потому, что рядом есть что-то более массивное. Если бы Луна обращалась по своей орбите вокруг Солнца, мы бы её считали нормальной планетой земной группы – она не отличается в основных деталях от них по ядру, мантии, коре, поверхности, истории.

**Спутники** могут покинуть планету, вокруг которой вращаются. Довольно долго существовала идея, что Меркурий был спутником Венеры, иначе сложно объяснить её особенности. Она очень медленно вращается, причём в обратном направлении. Непонятно, куда делся её момент импульса. А Меркурий как спутник вполне мог бы его отобрать. Луна имеет больший орбитальный спиновый момент импульса, чем Земля, то есть именно Луна хранительница механического момента в системе Земля – Луна, плюс она тормозит вращение Земли.

Ещё предстоит проверить, есть ли у спутников разрыв в массах и размерах.

Образцы грунта с Земли доставали с максимальной глубины всего в 11,5 км, а радиус Земли 6370 км. Поэтому внутрь Земли мы не проникли, но, по крайней мере, собрали с неё жидкие и газовые оболочки в том смысле, что теперь мы знаем не только **географию и поверхность континента** (рис. 4.2а), но и топологию поверхности Земли, в том числе и **дно океана** (рис. 4.2б).

Это было довольно сложно сделать. Сначала это делали с помощью эхолокации корабельными гидрофонами, а потом с помощью спутников. Сегодня спутники рассказывают о дне океана гораздо больше, чем радиолокационные прощупывания дна.

Жидкая поверхность океана повторяет, хоть и не так ярко, рельеф морского дна. Аномалии гравитационного поля, а они связаны с наличием разных выпуклостей и впадин в морском дне, сказываются на свободной поверхности океана. Конечно, волны там сильнее, но если сгладить движение волн, то поверхность океана довольно точно повторяет рельеф морского дна.

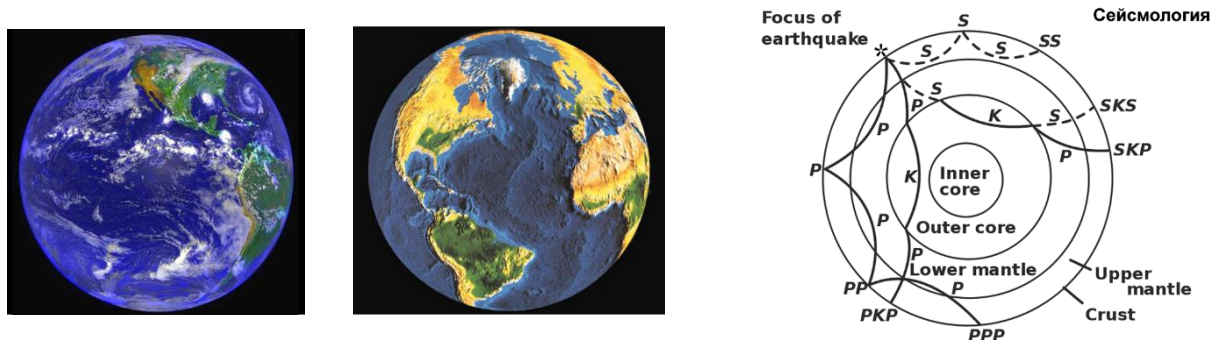


Рис. 4.2. а) поверхность континентов Земли, б) поверхность дна океана Земли, в) движения и преломление звуковых волн внутри Земли

Самое интересное на рельефе – **срединно-океанические хребты**. В Атлантике хребет очень хорошо проявляется, прямо посередине, но и в других местах они тоже есть. Океанское дно расколото на несколько плит, а поверх него плавают материковые плиты. Материки лёгкие, они плавают как пенопласт на поверхности воды, а морское дно сложено более плотными породами. Материк не может утонуть, а морское дно может под ним эволюционировать, и вот эти срединно-океанические хребты – зона спрейтинга. **Спрейтинг** – это выход из-под поверхности Земли более мягких пород. А стык – это **сукдукция** (подныривание). По краям материковых плит, выходя наружу, вещество земной мантии расплывается в двух разных направлениях. Морское дно от срединно-океанического хребта в одну и в другую сторону постепенно течёт, за сотни миллионов лет достигает материка и упирается в него. Материк лёгкий, твёрдая порода уходит вниз.

Всё, что мы знаем о внутренности Земли – это **сейсмическая разведка** либо вулканические извержения, подвижки морского дна, атомные взрывы под грунтом. Всё это рождает звуковые волны, и они бегут внутрь Земли и преломляются (рис. 4.2в), потому что чем глубже, тем плотнее, а чем плотнее, тем больше скорость звуковой волны. Одна часть волны замедляется, другая ускоряется, и волна поворачивает от плотного к менее плотному. Потом отражается от свободной поверхности, и мы что-то узнаём.

Узнали, что Земля в общем состоит из **четырёх основных слоёв** (рис. 4.3а). Твёрдое железно-никелевое ядро с мелкими добавками, над ним жидкое железное ядро. Это странно, так как там, где твёрдое, горячее, почти 6 тыс. градусов, а где жидкое, прохладнее, примерно 3,5 тыс. градусов. Так происходит, потому что кроме температуры есть ещё и давление. При большом давлении при температурах, которые в центре Земли, ядро всё равно твёрдое.

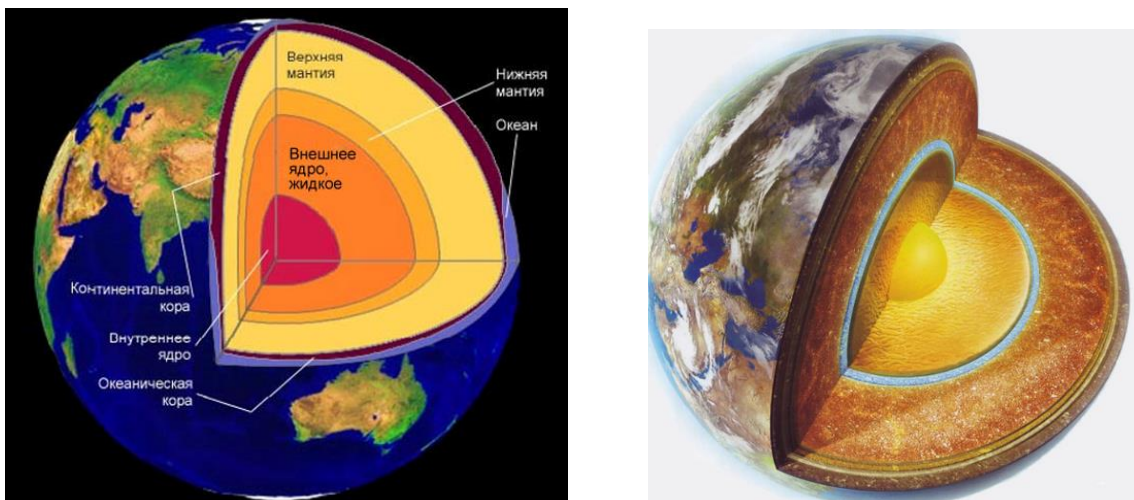


Рис. 4.3. (а) 4 основных слоя Земли, (б) переходные слои

Дальше идёт минеральная мантия, а самый верхний слой – твёрдая кора, она совсем лёгкая. Это не окончательное представление, есть ещё тонкие **переходные слои** между железным ядром и мантией, строение мантии и др. Почти каждый год возникает что-то новое. Например, на рис. 4.3б видно голубой слой, который обнаружен очень недавно.

**Мантию** можно считать жидким телом, потому что в ней происходит конвекция, но в то же время и твёрдым, иначе сейсмические волны плохо проходили бы через него. Там есть волны сжатия и волны сдвиговые, и сдвиг в жидком теле не работает, только в твёрдом. Оказалось, что это в разных временных шкалах. Когда речь идёт о минутах, часах, это твёрдое тело, а когда о миллионах лет, это жидкое тело, потому что ядро его нагревает, и мантия медленно сплывает, со скоростью 1–2 см в год от ядра наружу.

Более мягкие части всплывают, выходят на поверхность и расходятся в разные стороны (рис. 4.4). Это зона **спрейтинга** – расширения.

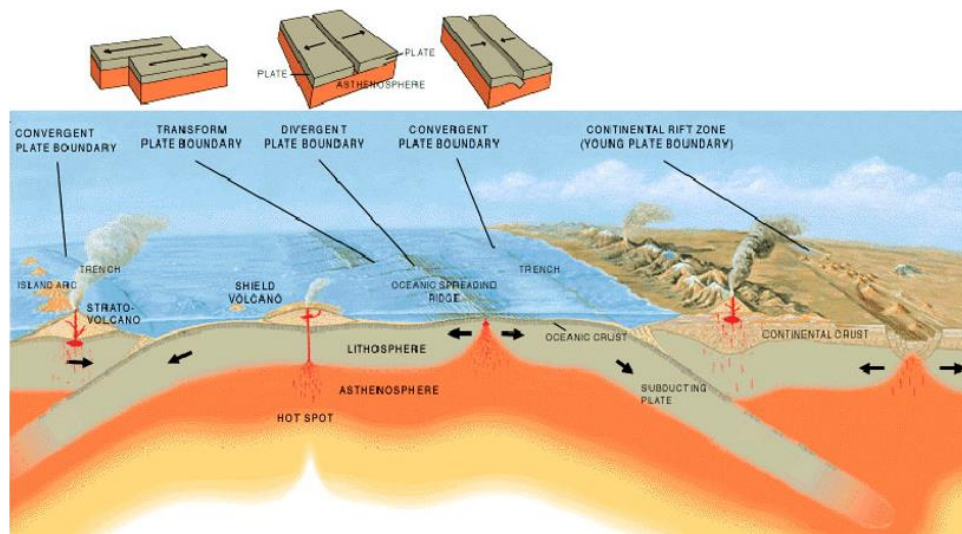


Рис. 4.4. Динамика литосферных плит

Мягкие части движутся, упираются в материковую плиту, подныривают под неё, потому что они плотные, а материк совсем лёгкий. Вместе с собой они уносят осадочные породы с большим количеством жидкости, та нагревается внизу, и по краям материков возникают вулканические цепочки (например, Курильские острова).

На карте (рис. 4.5а) хорошо видно, что **вулканическая активность** по краям материковых плит. Чёрные точки – эпицентры **землетрясений**. Их больше всего там: где происходит спрейтинг или подныривание, там наиболее сильное взаимодействие слоёв земной коры.

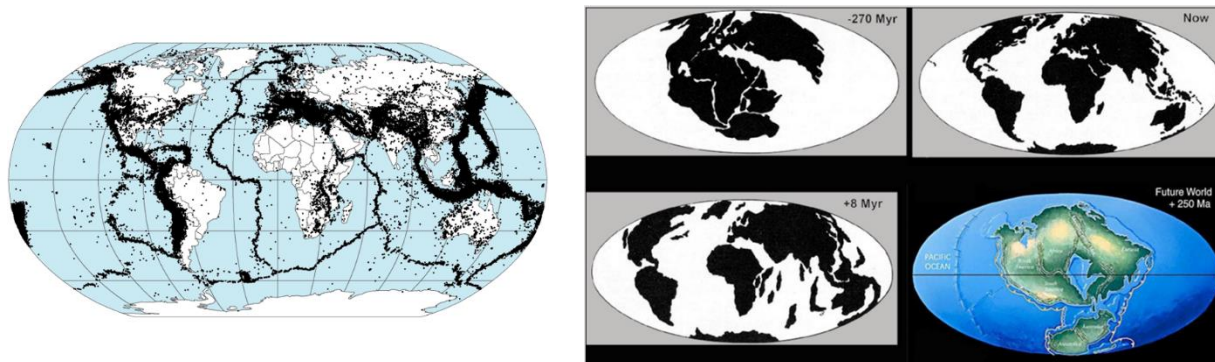


Рис. 4.5. а) зоны вулканической активности и землетрясений, б) движение континентов

За последние 300 млн лет большой суперматерик распался на несколько **континентов** (рис. 4.5б). Некоторые части двигались очень быстро (например, Индия была в Антарктиде, а потом приплыла к Азии, стукнулась, и получился Тибет).

Прогноз на будущее тоже можно сделать, но нельзя утверждать, что он будет верным, хотя сегодня мы довольно точно измеряем скорость движения материков.

На рис. 4.6а изображено, как рисуют **магнитное поле Земли** в школьных учебниках. Показывают, что в центре Земли как бы диполь, и он производит симметричное магнитное поле. Надо понять, что это за диполь, потому что это не может быть поле жёсткого полосового магнита, ведь в недрах Земли температура выше 5000 градусов по Кельвину, а железо уже при 600 градусах теряет магнетизм.

Поэтому это не твёрдый магнит, а **циркуляция потоков электропроводящей жидкости в ядре Земли**. Эта жидкость – верхняя часть железного ядра. Она кипит, там происходит конвекция. Но просто так кипение железа не создаёт магнитное поле, нужен ещё эффект вращения, чтобы сила Кориолиса направляла эти потоки в одну сторону. Есть вращение Земли, и довольно быстрое.

Венера похожа на Землю, но почти не вращается, и у неё нет магнитного поля. Значит, **быстрое вращение** – необходимое условие для генерации магнитного поля. А Марс быстро вращается, как и Земля, но у него нет магнитного поля, и мы не знаем, почему. Раньше мы говорили, потому что у него ядро хоть и железное, но оно остыло, и



там нет жидкого слоя. Но уже несколько лет на Марсе есть аппарат, который прозвонил недра планеты и определил, что **жидкая часть** в железном ядре есть.

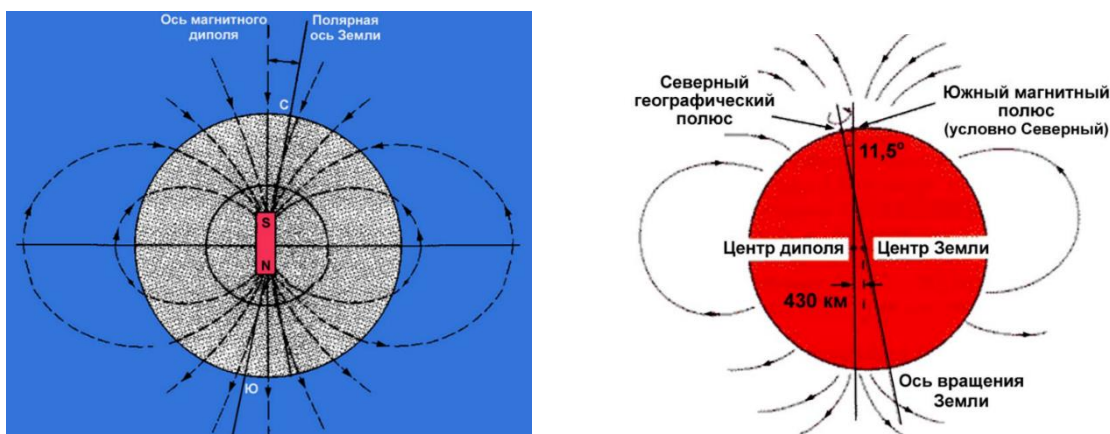


Рис. 4.6. (а) рисунок магнитного поля Земли в учебниках, (б) оно на самом деле

На самом деле магнитное поле Земли не такое уж идеальное (рис. 4.6б). Если на него более-менее наложить диполь, окажется, что его центр проходит не через центр Земли, оно **наклонено**. Ясно, что оно движется. Данной картинке уже лет двадцать, и в современных источниках число сверху уже будет не 11,5, а 10,5 градусов.

На рис. 4.7 представлена **индукция магнитного поля вдоль поверхности Земли** на уровне земной поверхности. Единицы на карте – нТл (10 мкГс). Видно, что в некоторых местах идёт усиление, но у диполя должно быть только два полюса, куда увеличивается напряжённость магнитного поля, а тут четыре. Значит, это точно не диполь.

**Основные полюса – Северный магнитный и Южный магнитный.** Заметим, что последний вообще на широте 65 градусов, то есть очень далеко от Южного полюса в Антарктиде. **Два других полюса** – ещё один слабенький диполь, наложенный на главный, более сильный. Более точное описание – квадруполь. Один дополнительный полюс **в Сибири**, другой в районе Бразилии.

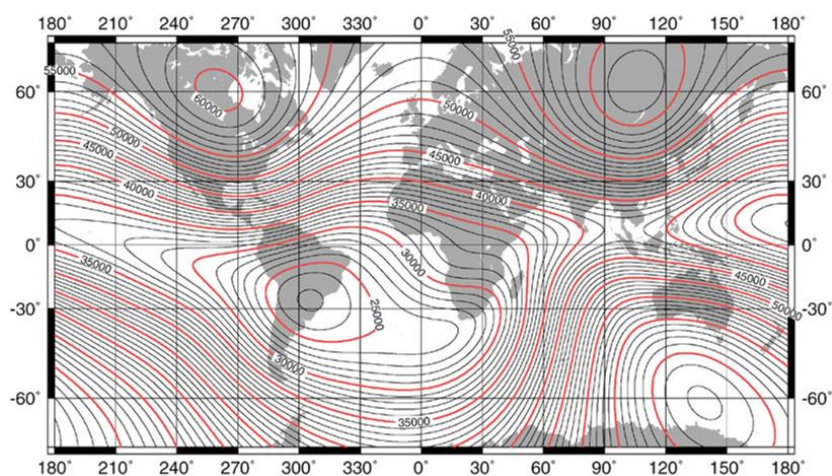


Рис. 4.7. Индукция магнитного поля вдоль поверхности Земли

**Бразильский полюс** доставляет большие проблемы космонавтам. Полюс – это магнитные силовые линии, которые приближаются к поверхности Земли, то есть возникает как бы магнитная воронка. Радиационные пояса вокруг Земли в районе бразильской аномалии подсаживаются, и когда космонавты подлетают – а широта небольшая, если из запускают с космодрома во Флориде, например, с широты 30 градусов, то и здесь орбита проходит на этой широте, а там сильная радиация. И даже спутникам без человека, если они слабые, иногда при пролёте над бразильской аномалией выключают напряжение на приборах, чтобы их не пробило радиацией.

Ну а над основными магнитными полюсами вообще лучше не летать, но там космонавты и не летают.

Магнитные полюса **движутся** (рис. 4.8а). **Географический полюс** – это точка, через которую проходит земная ось, вокруг которой крутится планета. А есть ещё два понятия – геомагнитный полюс и просто магнитный. Если сложное магнитное поле Земли опишем одним диполем (аппроксимация будет не очень точной, но это возможно), тогда ось выйдет в **геомагнитном полюсе**. А если будем ходить с компасом по поверхности Земли и искать место, где стрелка будет точно ориентирована перпендикулярно земной поверхности, то есть, где силовая магнитная линия прямо уходит в землю, то найдём **магнитный полюс**. То же самое на севере.

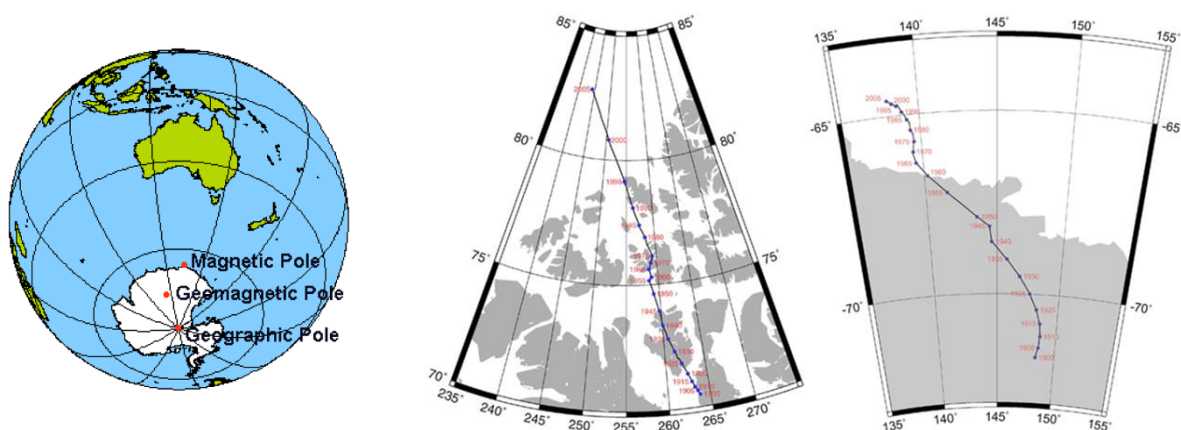


Рис. 4.8. а) географический, геомагнитный и магнитный полюса, б) перемещение Северного и Южного магнитных полюсов Земли за период с 1900 по 2005 год

На рис. 4.8б представлено **перемещение Северного и Южного магнитных полюсов** Земли за период с 1900 по 2005 год. Видно, что Северный полюс на левом изображении движется быстро и с нарастающей скоростью, покидает Канаду и уходит в сторону Северного географического полюса. Дальше он перевалит через географический полюс и придёт к нам в район Северного Урала. После этого там будет самое лучшее полярное сияние, потому что в месте полюса заряженные частицы устремляются вдоль линий силового поля к поверхности Земли.

А Южный полюс уже давно ушёл с материка и сейчас гуляет по Индийскому океану.

Магнитное поле «дышит» со временем. Моряки плавали с компасами с 16 века и измеряли **магнитное склонение** (рис. 4.9а). Магнитное склонение – это то, насколько направление магнитной стрелки отличается от направления на север.

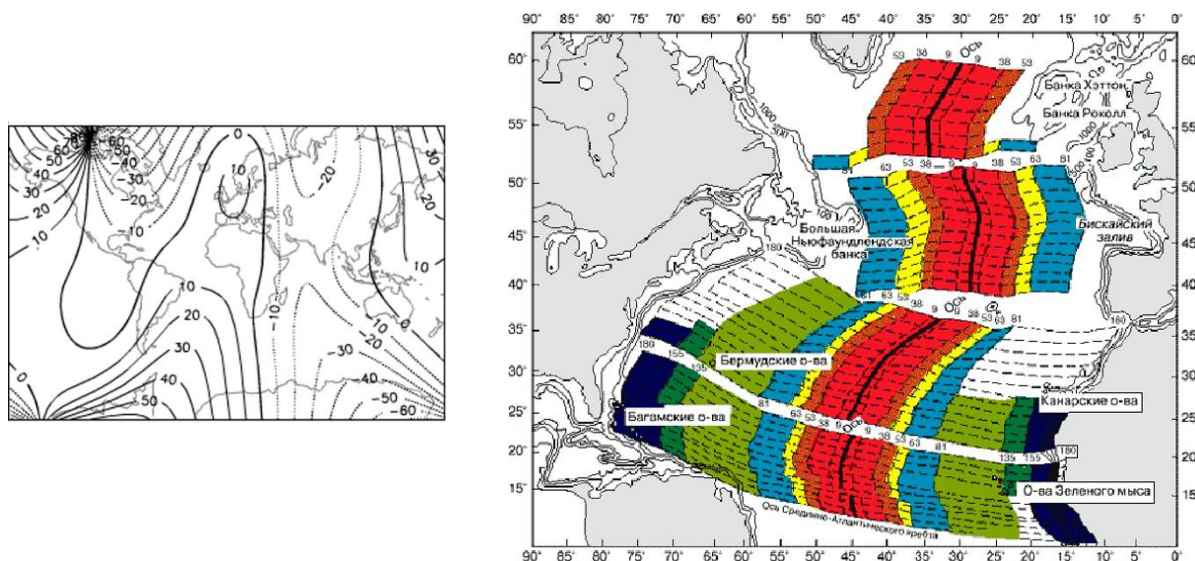


Рис. 4.9. Изменение магнитного склонения по измерениям моряков (а) и по данным океанического дна (б)

Более глубокие исторические записи хранит океанское дно (рис. 4.9б). В Срединно-океаническом хребте горячее вещество всплывает и остывает. В момент его остывания магнитные домены железа ориентируются вдоль магнитного поля, запоминая его направление, дальше холодное вещество течёт в обе стороны, и можно промерять направление магнитного поля, застывшего в породе океанского дна. Если мы знаем, как менялось поле, можем узнать эпоху, когда всплыло это вещество, и то же самое наоборот.

Магнетологи установили, что **направление** магнитного поля **меняется** очень **хаотично**, но периодичность не нашли.

Теория, которая объясняет возникновение магнитного поля у планет, называется **теорией геомагнитного динамо**. Мы знаем динамо эффект: крутим генератор, он крутит магнитное поле мимо катушки с электричеством, эффект Фарадея вырабатывает электричество, а где электричество, там и магнитное поле. Это самоподдерживающийся процесс.

На рис. 4.10а представлен результат **3D расчёта**. В середине видно жидкое ядро Земли, дальше идёт мантия, но она ничего не генерирует, просто пропускает через себя магнитные силовые линии. Внутри тоже ничего не генерируется, там твёрдое железо, а вот слой мягкого кипящего конвектирующего железа генерирует магнитное поле. Голубые магнитные линии – северные, жёлтые – южные.

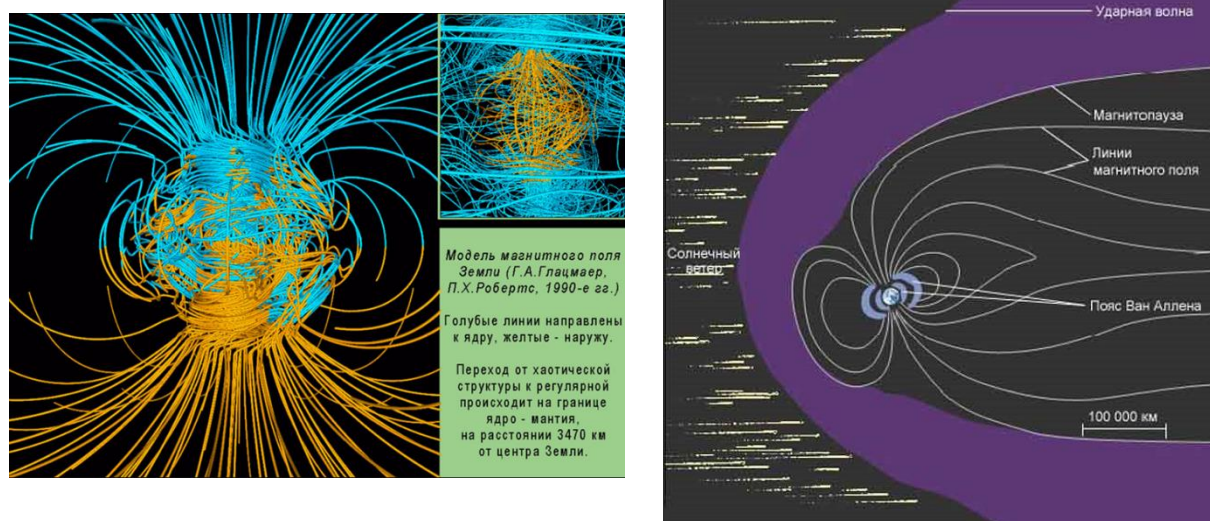


Рис. 4.10. а) модель магнитного поля Земли, б) деформация магнитного поля под влиянием солнечного ветра

Время от времени эта **структура меняется**: она нарушается, потом восстанавливается до почти диполя, потом снова хаос, дальше опять возникает диполь в другую сторону.

С удалением от планеты **магнитное поле ослабевает** очень быстро (рис. 4.10б), напряжённость падает как  $r^3$ , и уже на определённом расстоянии начинает взаимодействовать с магнитным полем, переносимым солнечным ветром, солнечной плазмой. И когда динамическое давление выравняется, у них наступает **равновесие давлений** (линия на рисунке).

Внутри **солнечная** плазма обычно не проникает, она **стекает** по магнитным линиям в хвост магнитосферы планеты (на рисунке вправо и вниз). Но немного её всё же проникает, потому что места около полюсов работают как ловушки. Где-то там вдалеке магнитные силовые линии ослабевают, плазма может уже проникнуть вглубь и стечь к полюсам. Это, конечно, не прямо солнечная плазма, там возникают колебания, на полюса сбрасываются частицы, в основном быстрые протоны, которые уже давно накопились в радиационных поясах Земли.

Поэтому вокруг магнитного полюса есть **кольцо полярных сияний** (рис. 4.11а). Это область, где магнитные силовые линии касаются верхних слоёв атмосферы. Там уже начинает взаимодействовать поток солнечных космических лучей и верхних слоёв земной атмосферы. Это высоты 400–600 км от Земли. Сейчас данная область ярких полярных сияний сдвинута в сторону Канады. Это довольно опасное явление, потому что наводит электрический потенциал в трубопроводах, линиях электропередач. Поэтому именно над Канадой за последние полвека были большие техногенные катастрофы, когда вспышка на Солнце и сброс большого потока космических лучей на север Канады лишил электричества целые провинции, горели трансформаторы.

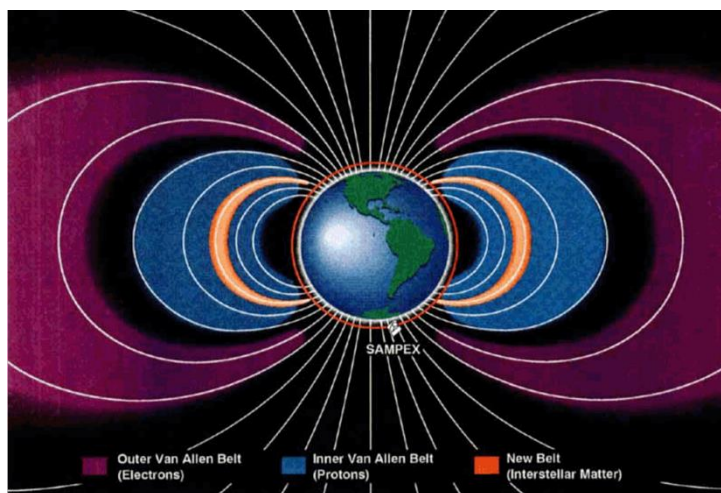
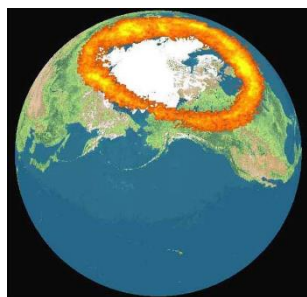


Рис. 4.11. а) кольцо полярных сияний вокруг магнитного полюса Земли, б) электронный и протонный пояса Земли

В силовых линиях магнитного поля есть **области**, более плотно **заполненные быстрыми частицами** (рис. 4.11б). Электроны лёгкие, интенсивнее взаимодействуют с магнитным полем, поэтому они накопились в области не такого мощного магнитного поля. **Электронный пояс** закрашен фиолетовым, он окружает Землю как тор. **Протонный пояс** расположен глубже, а дальше рядом в Землѣ пустота, потому что заряженные частицы могут двигаться вдоль силовых линий, а поперѣк им двигаться трудно. Поэтому они путешествуют от полюса к полюсу, могут коснуться атмосферы, столкнуться с её атомами и погибнуть. Выше тоже нарисован свободный слой, но это не совсем так.

Поэтому космонавты могут летать только в нижней чѣрной области, по орбитам, не сильно наклонѣнным к экватору и не очень высоко поднимающимся над земной поверхностью (до 600 – 700 км).

У **других планет** тоже чем сильнее **магнитное поле**, тем мощнее **радиационные пояса**. В радиодиапазоне **Юпитер** выглядит как на рис. 4.12а, то есть там ускоренное движение заряженных частиц в магнитном поле генерирует радиоволны. Это в основном длинные волны, дециметрового и метрового диапазона.

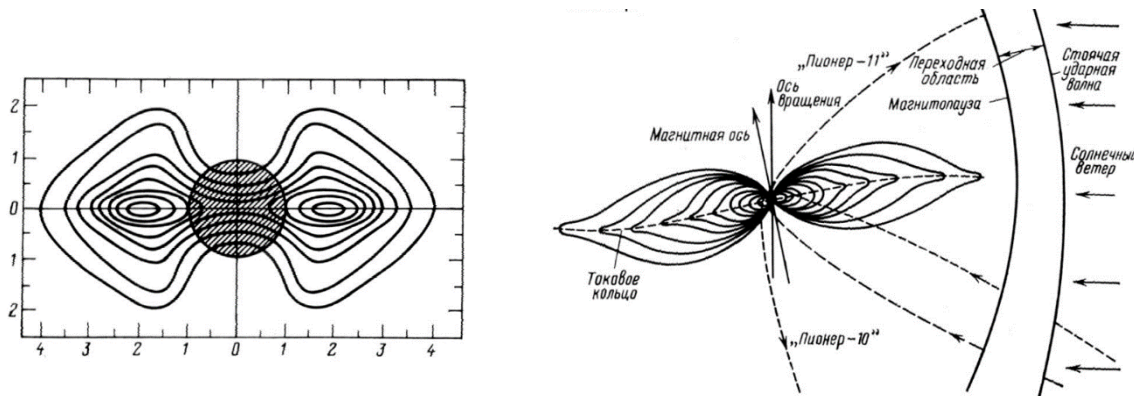


Рис. 4.12. Радиоизображение Юпитера на волне 10,4 см

То есть Юпитер – мощный радиоисточник. Его **магнитосфера** тянется очень далеко даже в ту сторону, откуда дует солнечный ветер, а в ту сторону, куда сносит магнитосферу Юпитера, вообще до Сатурна и даже чуть дальше (рис. 4.12б).

Более мелкие тела типа **крупных спутников** устроены также: ядро, мантия, кора. Но у **Луны** (рис. 4.13а), например, очень маленькое ядро. Судя по сейсмическим прозвонам, оно километров 200 в радиусе, железное. Но в основном Луна состоит из минеральных пород.

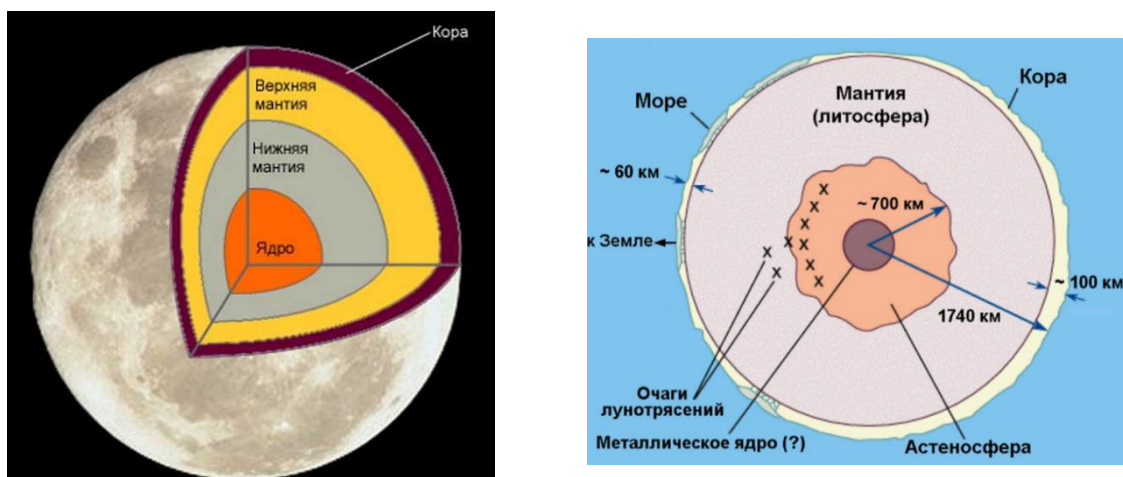


Рис. 4.13. (а) строение Луны, (б) очаги лунотрясений

На рис. 4.13б показано, как мы представляем себе Луну. На границе твёрдой (литосферы) и полумягкой (астеносферы) областей есть очаги лунотрясений.

**Меркурий** снаружи похож на Луну, но **внутри** совсем другой (рис. 4.14). У него гигантское железное ядро (в относительных единицах к радиусу планеты самое большое среди планет Солнечной системы). Самая популярная на сегодняшний день идея, объясняющая это, состоит в том, что Меркурий с чем-то столкнулся, и у него снесло верхний слой мантии. Размер ядра Меркурия почти как у Земли, а диаметр самой планеты почти в три раза меньше.

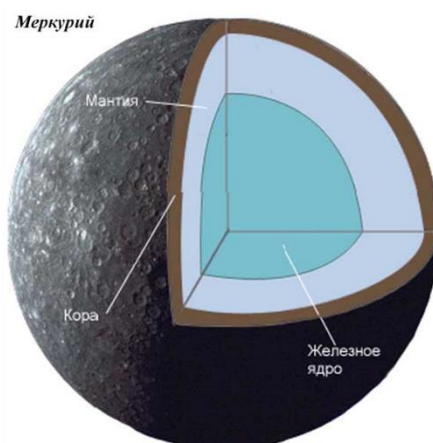


Рис. 4.14. Строение Меркурия

Но пока никаких исследований на Меркурии не проводилось, сейсмических данных нет. И мы можем только по средней плотности, размеру, объёму планеты судить о том, что у неё внутри и что снаружи.

**Ледяные планеты-гиганты – Уран и Нептун** (рис. 4.15) – устроены в целом так же, как планеты земного типа – есть ядро и мантия, но ещё есть огромный протяжённый слой, который можно назвать океаном или атмосферой. Это жидкая мантия, которая состоит из лёгких соединений – метана, водорода; гелия там не очень много.

А вот **газовые планеты-гиганты – Юпитер и Сатурн** – состоят примерно на три четверти из водорода и на четверть гелия (рис. 4.15). Всё более-менее твёрдое упаковано внутри.

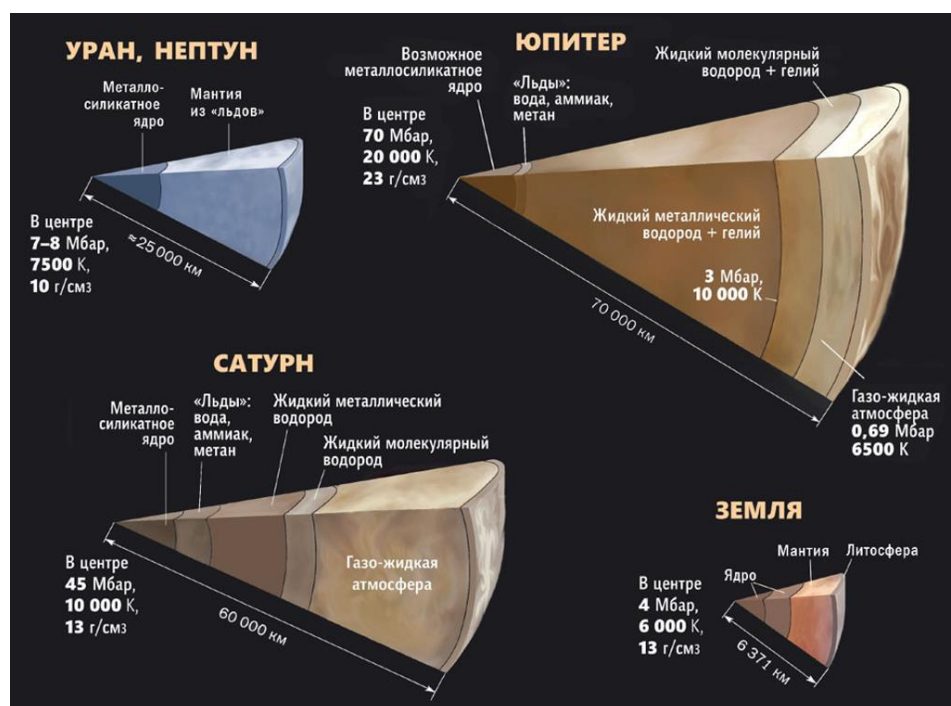


Рис. 4.15. Внутреннее строение планет-гигантов и Земли

Это стали узнавать только несколько лет назад, когда на орбиту Юпитера вышел аппарат «Джуна». Он летает близко к планете по высокой эллиптической орбите и может измерить гармоника гравитационного поля. Юпитер вращается быстро, и сжатие внутренних слоёв зависит от того, как там распределены элементы, какая средняя плотность и т. д. А «Джуна» мерит отклонение гравитационного поля от сферической симметрии. Сейчас начинаются новые расчёты того, что внутри у Юпитера.

Если «вынуть» часть планеты, как показано на рис. 4.15, можно сравнить **строение планет-гигантов и Земли**. Но надо иметь в виду, что Землю мы хоть как-то изучили, а остальное – чистая теория, и лишь по внешним характеристикам планеты уточняются теоретические представления о том, что у неё внутри.

Но даже если взять Землю, температура её центра от 4 до 6,5 тыс. кельвинов. Это огромный диапазон. 4 тыс. кельвинов – это температура красных карликов, совсем

холодных звёзд. А 6,5 тыс. кельвинов – жёлтые, почти белые звёзды, они горячее, чем Солнце.

Причина такой **высокой температуры в недрах Земли** – радиоактивный распад и просто запас тепла, который сохранился с тех пор, когда Земля формировалась. Она очень медленно остывает, но, если бы радиоактивного распада не было, Земля была бы намного холоднее, но градиент бы всё равно был.

А вот температура 20 тыс. кельвинов, которая предполагается в центре Юпитера, на поверхности голубых гигантов – самых раскалённых звёзд.

На рис. 4.16 показано, как меняется **размер холодного тела** в зависимости от его **массы и состава**. А планеты можно считать холодными телами, ведь они держат себя не давлением газа, как звёзды, а просто Ван дер Ваальсовыми силами.

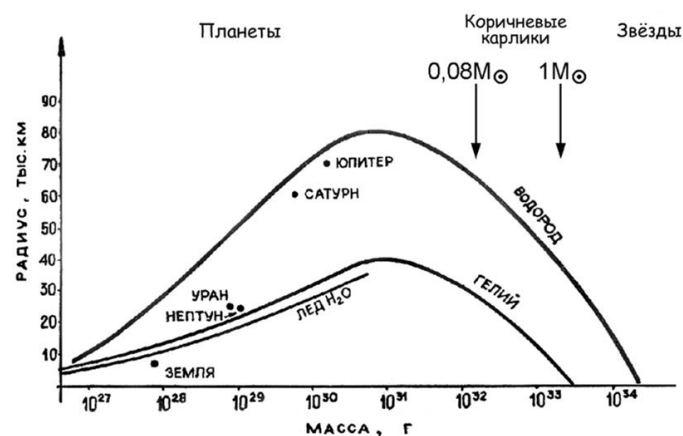


Рис. 4.16. Изменение размера холодного тела в зависимости от его массы и состава

Чисто железных планет нет, близкое к этому поведению может быть у **Меркурия**. А в промежутке между газовыми и железными планетами **Земля, Марс, Венера**. Больших планет из твёрдой массы или нет, или мы пока не нашли.

А вот у **ледяных и газовых планет** масса огромная. Если бы мы на **Юпитер** навалили ещё много-много водорода и гелия, Юпитер бы немного подрос. Мы знаем такие планеты с массой в 5–20 раз больше. Планеты с массой в 5–10 раз больше Юпитера по размеру больше него на 10–20%, а ещё более массивные становятся меньше, там гравитация побеждает давление вещества. Таким образом, с увеличением массы самые большие холодные газовые тела становились бы всё меньше и меньше.

В какой-то момент они становятся звёздами, и тогда внутри них совсем другая физика. Начинает выделяться тепло, повышаться давление газа, и они выходят на какой-то стационар и даже могут подрасти, пока в недрах есть источник тепла. В конце концов он пропадает, всё сгорает, и маленькие тела всё равно сжимаются.

Некоторые **спутники** обладают необъяснимо **высокой температурой недр**. На рис. 4.17а изображён спутник Юпитера **Ио**. На нём вулканы, извержения. Здесь не



обойтись без **внешнего источника энергии**, которая трансформируется в тепло в недрах этого тела. Он размером с Луну и уже давно остыл бы, но рядом Юпитер.

А вот **Европа** (рис. 4.17б) почти остыла. Она дальше от Юпитера, гравитационное влияние слабее, приливный эффект не такой сильный, и там на поверхности лёд.

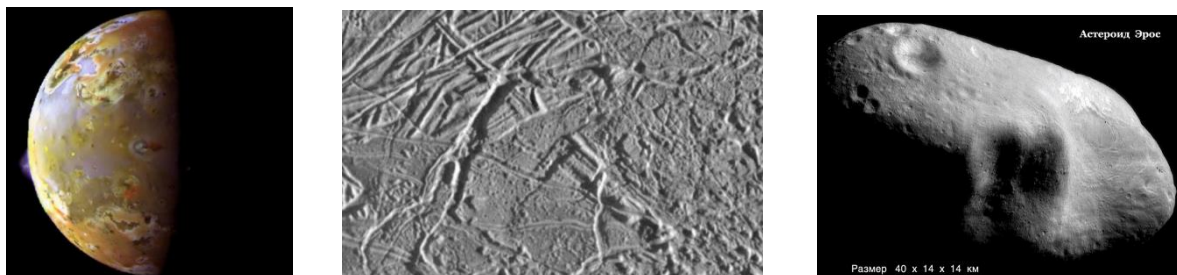


Рис. 4.17. (а) – поверхность Ио, (б) поверхность Европы, в) астероид Эрос

Тела, совсем **лишённые внешних источников тепла** (солнечные лучи не считаются, они только чуть-чуть подогревают поверхность), холодные. Это относится к **астероидам** (рис. 4.17в), хотя пока на уровне предположения, мы их температуру в недрах не мерили.

### Эволюция Солнечной системы

**Планеты**, как правило, **рождаются** рядом со звёздами. Хотя это может быть и неверным, потому что мы их открываем рядом со звёздами, это легче, чем обнаружить планету, летающую где-то в межзвёздном пространстве. Такие одиночные планеты тоже обнаруживаются, но мы думаем, что они всё равно родились со звёздами, а потом их что-то выбросило из молодой планетной системы.

А **звёзды рождаются** в молекулярных облаках, мы это сегодня хорошо представляем (рис. 4.18). Группа звёзд рождается, потом нагревает остатки газа, он покидает область формирования звёзд, а в ней остаётся несколько звёзд, взаимодействующих друг с другом, и каждая сохраняет рядом с собой протозвёздное вещество, из которого могут рождаться планеты.



Рис. 4.18. Рождение звёзд в молекулярных облаках

Но даже в течение двадцатого века представление о том, **как формируются планеты**, очень сильно менялось. Рис. 4.19а из книжки середины двадцатого века. Тогда заметили особенность распределения планет в Солнечной системе по расстоянию от Солнца: сначала маленькие, потом большие, дальше опять маленькие. Возникла идея, что из Солнца была выброшена струя. Если рядом пролетела какая-то звезда, она могла

своим приливным вытянуть часть солнечной атмосферы. Хватило бы даже 1/1000 массы. Потом на разных расстояниях эта струя распалась на отдельные сгустки.

Эта красивая **идея** принадлежала физика **Дж. Джинсу**. Более того, он, зная количество звёзд в Галактике и скоростью их движения, подсчитал вероятность пролёта одной звезды рядом с другой. Оказалось, что на всю Галактику за всё время её жизни только один раз могло быть сближение звёзд на такое короткое расстояние. Тогда считали, что так и произошло с Солнечной системой, другие звёздные системы с экзопланетами ещё не были открыты.

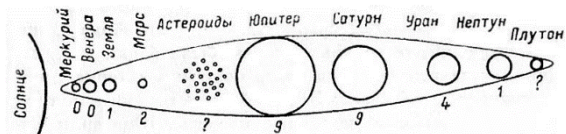
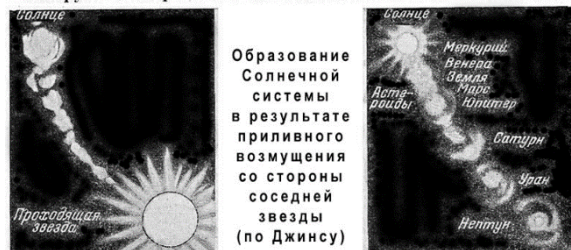
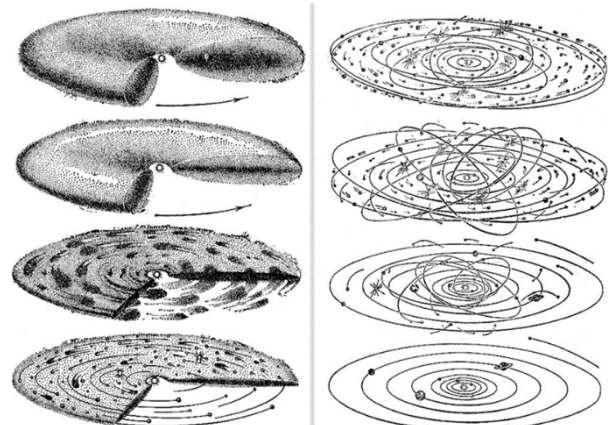


Рис. 14. Схема, поясняющая происхождение планет из сигарообразной струи газа. При каждой планете показано число ее спутников.



Образование Солнечной системы в результате приливного возмущения со стороны соседней звезды (по Джинсу)



Этапы формирования Солнечной системы по О. Ю. Шмидту

Рис. 4.19. а) гипотеза происхождения планет из сигарообразной струи газа, б) теория формирования Солнечной системы О. Ю. Шмидта

**Ю. Д. Шмидт** в конце жизни предложил **правильную теорию формирования планетных систем** (рис. 4.19б). Он предполагал, что звезда пролетает через газопылевое облако, захватывает вещество, которое выходит на орбиту (у него есть какой-то момент), потом сжимается. Дальше картинка показывает, как планеты формируются путём коагуляции – слипания мелких частиц в более крупные. Многие детали потом поменялись, но в целом мы так себе и представляем это сейчас.

В 1990-е годы телескоп Хаббл помог открыть в тех областях, где формируются звёзды, **протопланетные диски** (рис. 4.20а). Правда, точной картины этого ни один телескоп не может показать.

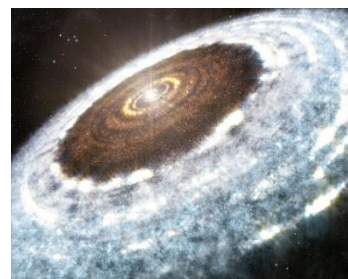
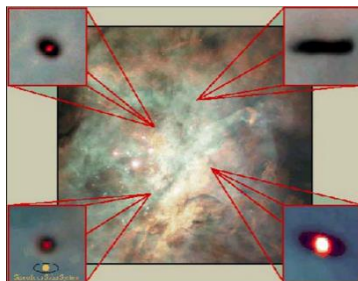


Рис. 4.20. (а) – протопланетные диски, (б) – линия снегов

Мы даже стали понимать, почему снаружи Солнечной системы планеты богаты водородом, гелием – летучими веществами, а внутри неё они каменные.

Протопланетный диск Солнца (рис. 4.20б) нагревался из центра, там была высокая температура, и всё летучее улетучилось на периферию диска и замёрзло. На краях сформировались планеты-гиганты, а ближе к Солнцу планеты земной группы. Граница между этими областями называется **границей льдов** или **линией снегов**.

Но это всё были рисунки художников, а несколько лет назад мы стали это реально фотографировать в микроволновом диапазоне с помощью гигантской системы **ALMA** (Атакамская большая система миллиметрового диапазона). Мы увидели молодую звезду (рис. 4.21а), окружённую светящейся **горячей пылью**. Пыль, нагретая до нескольких сотен кельвинов, уже начинает излучать в микроволновом диапазоне.

Также видно круговые **пустые дорожки** (рис. 4.21б).

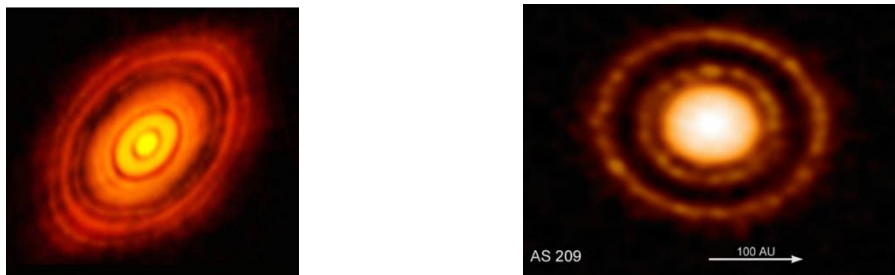


Рис. 4.21. Фотографии протопланетных дисков, сделанные с помощью ALMA

Первой идеей было, что это уже сформировались планеты и почистили коридор вдоль своей орбиты, но сейчас стали появляться сомнения в этом. Возможно, диск сам распадается на отдельные кольца. Можно вспомнить кольца Сатурна, где диск распался, потому что там разные свойства и гравитационное взаимодействие. Но так или иначе это всё равно связано с рождающимися планетами.

Есть очень интересное новое направление в космологии – **экспериментальная космогония**. Космология – наука о прошлом Вселенной, о крупномасштабных процессах в ней, а космогония – наука о формировании и эволюции звёзд и планетных систем. После создания интерферометра миллиметрового диапазона космогония стала экспериментальной наукой.

Если детально посмотреть на планетную систему (рис. 4.22), то мы увидим внутри неё её маленькие копии. Это **микропланетные системы**, где планета играет роль звезды (Юпитер, Сатурн), а вокруг неё формируется много спутников. Они в какой-то степени повторяют историю формирования планетной системы в целом.

Возможно, повторение не очень точное, хотя что-то общее можно найти. Например, **спутники Юпитера** Ио, Европа, Ганимед, Каллисто **распределены по средней плотности**: более плотные вблизи Юпитера, менее плотные вдали от него. То же самое верно для планет Солнечной системы: плотные планеты земной группы рядом с Солнцем, рыхлые гиганты на периферии. Значит, Юпитер в эпоху формирования спутников играл роль центральной звезды. Он нагревал свои окрестности, изгонял летучие вещества наружу.

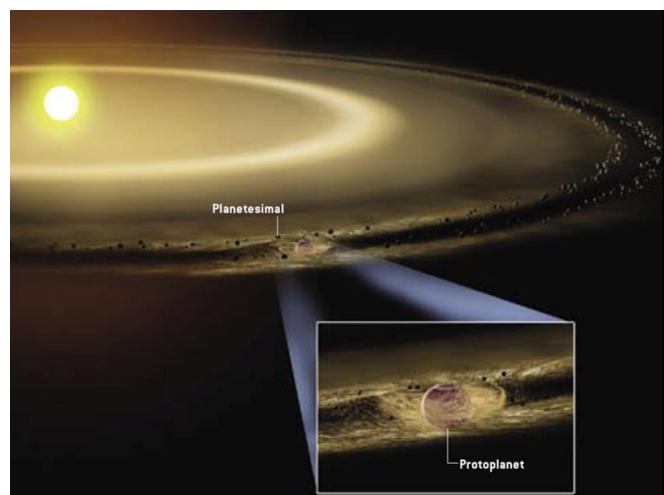


Рис. 4.22. Микропланетная система Юпитера

Посмотрим на **спутники Сатурна**, с которыми всё аналогично (рис. 4.23). Внутри спутники очень **регулярные**, все крутятся в одном направлении и в одной плоскости как микропланетная система. Причём более плотные ближе к Сатурну, менее плотные дальше. Ясно, что они формировались тогда, когда и планета, и не улетят. А снаружи **иррегулярные** спутники, они захваченные. Астероиды пролетали рядом и оказались в плену гравитации Сатурна.

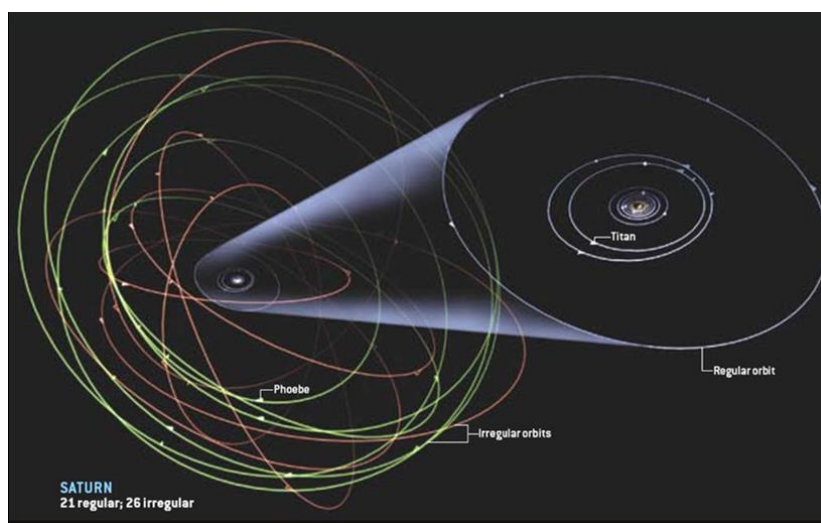


Рис. 4.23. Спутники Сатурна

Есть разные **идеи** по поводу того, как можно **захватить спутники** из мимо пролетающих тел. Если есть центр гравитации и издалека летит тело по гиперболической орбите, оно и дальше полетит по гиперболе.

На рис. 4.24 показано **три разных подхода**. Либо тело тормозилось в протяжённой атмосфере планеты (верхние картинки). Либо планета формировалась и наращивала свою массу, в итоге область гравитационного контроля накрыла орбиту пролетающего тела (средние картинки). Либо был двойной объект, и, пролетая мимо

массивной планеты, за счёт приливного эффекта потерял связь; результате этого одно тело вышло на орбиту, а другое улетело (нижние картинки).

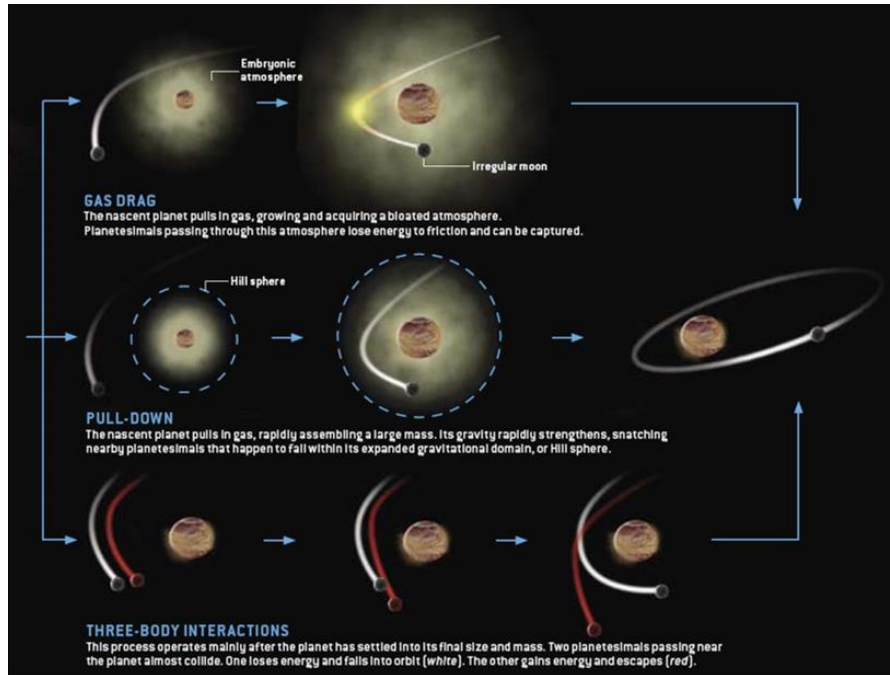


Рис. 4.24. Три варианта захвата спутников планетой

Приливный эффект может в зависимости от положения тела одно притормаживать, а другое ускорять. Мы сегодня это наблюдаем довольно часто, когда двойные звёзды пролетают мимо чёрных дыр в центре Галактики. Скорее всего, все три эффекта конкурировали друг с другом.

## Лекция 5. Планеты иных звёзд

### История открытия экзопланет

Долгое время учёные не знали о существовании экзопланет. Звёзды очень яркие (рис. 5.1), и шансов увидеть рядом с ними маленькое еле светящееся тело раньше почти не было.



Рис. 5.1. а) звёзды, б) горящий и потушенный фонарь

На Землю падает одна десятиллиардная доля солнечного света, причём часть его отражается, а часть поглощается. Это можно представить так: нас ослепляет фонарь (звезда), и рядом сложно что-то разглядеть (рис. 5.1б). А если его потушить, рядом с ним можно увидеть **маленький светящийся объект** и попытаться его разглядеть.

Но фонарь-звезду потушить нельзя, а если и получится, то и планета перестанет быть видимой, так как светится отраженным светом. Значит, шансов увидеть планету почти нет, мы их почти и не видим. Среди тысяч экзопланет, о существовании которых мы знаем, видим мы максимум **пару дюжин самых крупных**, да и то, как правило, в том случае, когда звезда крайне низкого блеска, а планета сама светится инфракрасным тепловым излучением (например, супер-Юпитер).

Посмотрим на Солнечную систему издалека. Если бы мы смотрели от  $\alpha$  созвездия Кентавр – то есть от ближайшей к нам планетной системы – мы бы увидели Солнечную систему в соответствии с рис. 5.2а. **Максимальное расстояние и максимальный блеск**, как правило, не совпадают. Когда максимальное угловое расстояние от звезды, мы видим только половину её освещённого полушария.

	Расстояние от звезды	Блеск
Меркурий	0,3''	27 <sup>m</sup>
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

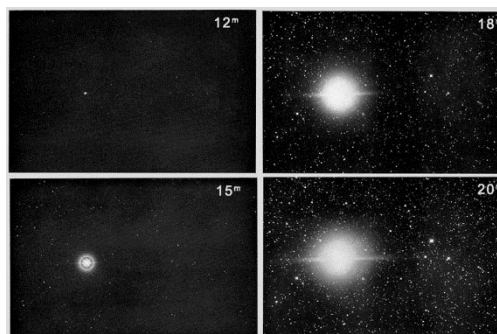


Рис. 5.2. а) Солнечная система при наблюдении от  $\alpha$  Кентавра, б) участок неба в созвездии Возничий с разными экспозициями

Современные телескопы на фоне чёрного неба это могут легко увидеть. Юпитер и Сатурн могут рассмотреть даже любители. На крупных телескопах вроде шестиметрового можно увидеть блеск 24, а на десятиметровом и 27. Телескоп Хаббл видит до 30.

Два объекта с расстоянием в одну угловую секунду разрешает даже хороший любительский телескоп, при ясном небе получится иметь даже разрешение 0,3 секунды.

А **видимый блеск Солнца**, если смотреть на него от  $\alpha$  Кентавра, 0,5. Сочетание слабого блеска с очень малым угловым расстоянием от очень яркой звезды сильно затрудняет возможность увидеть планету, хотя для Юпитера и Сатурна ещё шанс был бы.

На фотографиях на рис. 5.2б **разные экспозиции** одной и той же области неба. Первая фотография – маленькая экспозиция, яркая звезда оставляет вполне компактное изображение, но там ничего слабо светящегося не видно. Переходя к более длительным экспозициям (другие три фотографии), можно увидеть много слабо светящихся объектов, но рядом с яркой звездой мы их уже не увидим. Её свет заливает окрестности – это и рассеянный в земной атмосфере свет, и рассеянный в оптике, и дифракционные кольца, и рассеянный свет в приёмнике излучения.

Великий теоретик К. Торн в 1960-е гг. писал о нейтронных звездах: «Такой объект будет иметь диаметр порядка 30 км, и он будет быстро остывать. Надежда увидеть такой тусклый объект столь же мала, как и надежда увидеть планету, принадлежащую другой звезде. Иными словами – надежды нет».

Однако в 1967 г. открыли нейтронные звёзды, а ещё до этого астрономы-практики пытались **почувствовать присутствие планеты** на орбите вокруг звезды. Планету не будет видно, но сама звезда будет **перемещаться** в том же темпе относительно общего с планетой центра масс (рис. 5.3).

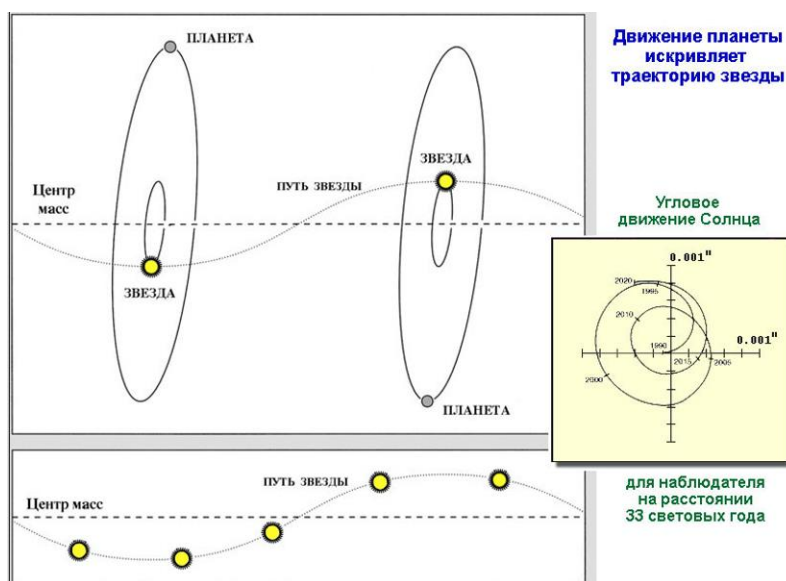


Рис. 5.3. Искривление траектории звезды из-за движения планеты

Угловые перемещения звезды на фоне неба должны быть **регулярными**, периодическими. Периодический сигнал всегда легче выделить на фоне помех. Значит, если увидим, что звезда относительно своего среднего собственного движения начинает синусоидально вилять, значит, рядом с ней планета.

Пусть мы наблюдаем Солнечную систему с расстояния 10 парсек (33 световых года). На маленьком рисунке справа показано, как Солнце перемещалось бы вокруг центра масс Солнечной системы. Период такого перемещения был бы примерно 12 лет, потому что почти всё влияние оказывал бы Юпитер. Но масштаб перемещения – тысячная доля угловой секунды. С поверхности Земли заметить это практически невозможно, у нас размеры изображения звезды на фотопластинке – секунда.

Чтобы начать такие наблюдения, надо было найти близкие звёзды. Взяли **Летящую Звезду Барнарда** (рис. 5.4а), вторую по расстоянию от нас. Она быстро перемещается на небе, и за её собственным движением удобно смотреть. Это делал Питер ван де Камп, американский астроном, в обсерватории Спрул, на длиннофокусном (24-дюйм) рефракторе (рис. 5.4б). Длиннофокусный телескоп, чтобы масштаб изображения в фокальной плоскости был большой, и можно было точно измерять углы.

Учёный 20 лет наблюдал за некоторыми звёздами, в том числе за Звездой Барнарда. В начале 60-х годов он объявил, что Звезда Барнарда движется по **синусоиде** (рис. 5.4в). У прямого восхождения к  $\delta$  ещё добавлен косинус, а у смещения его нет, чтобы и там, и там были линейные единицы на небе. Камп объявил, что у звезды Барнарда есть один массивный спутник типа Юпитера, а через несколько лет – что их два или три, то есть открыл планетную систему около Звезды Барнарда.

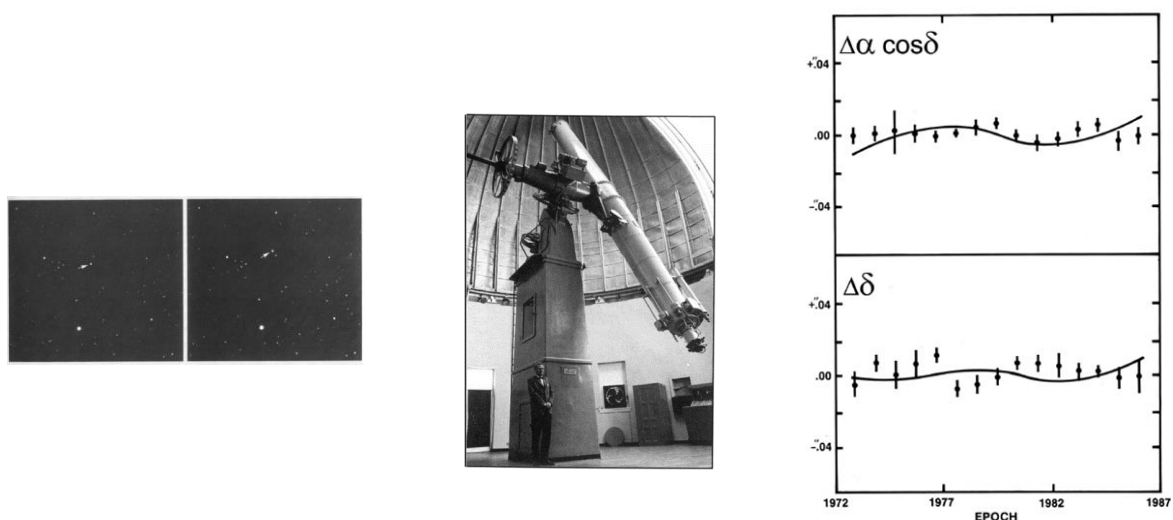


Рис. 5.4. (а) Летящая Звезда Барнарда, (б) 24-дюйм рефрактор обсерватории Спрул, (в) движение звезды Барнарда

Но в 1972–1976 гг. ученики Кампа на более качественном телескопе Морской обсерватории построили астрометрический рефлектор (61-дюйм) (рис. 5.5а), и показали, что никаких видимых смещений нет (их измерения отмечены точками), а «синусоиду»



формируют так называемые **систематические эффекты**: телескоп может гнуться, нагреваться летом и остывать зимой, может меняться фокусное расстояние. Интересно, что уже в 2000-е у Звезды Барнарда действительно обнаружилась планета, но совсем не такая, как предполагал Камп: она оказалась маленькой и не способной вызвать эффекты, которые он описал.

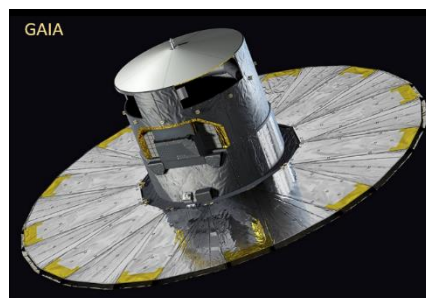
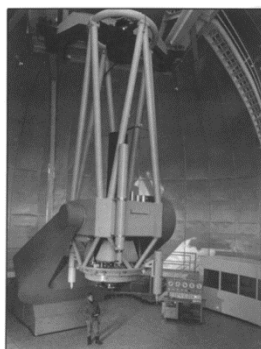


Рис. 5.5. (а) 61-дюймовый астрометрический рефлектор Морской обсерватории, (б) спутник GAIA

Теперь такие же наблюдения обещают нам большое количество найденных планет у других звёзд, потому что точности астрометрических измерений возросли в тысячи раз. Если у Кампа была точность несколько сотых долей угловой секунды, то сейчас летает **спутник GAIA** (рис. 5.5б), точность которой сотысячные доли угловой секунды (0,00002 угловой секунды).

Но надо накопить некоторый наблюдательный материал, так как планеты движутся медленно. Данный аппарат летает уже около 10 лет и может летать ещё лет 5.

Также учёные стали думать, как иначе проверить, есть ли планеты, а дальше и найти их. Стали смотреть на области, где рождаются молодые звёзды. У некоторых молодых звёзд «Хаббл» в начале 90-х годов обнаружил **протопланетные диски** (рис. 5.6а). Если есть диски, должны быть и планеты.

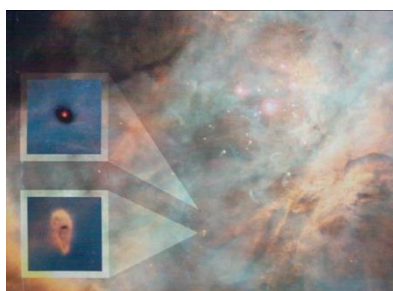


Рис. 5.6. (а) фотографии протопланетных дисков с «Хаббла», (б) пылевой аккреционный диск вокруг звезды IM Lupi с спектрографа SPHERE

В инфракрасном диапазоне **спектрограф SPHERE** на восьмиметровых телескопах позволяет увидеть какую-то **структуру протопланетных дисков** (рис. 5.6б) самых близких к нам звёзд. А **ALMA** показывает детально структуру дисков (рис. 5.7а).

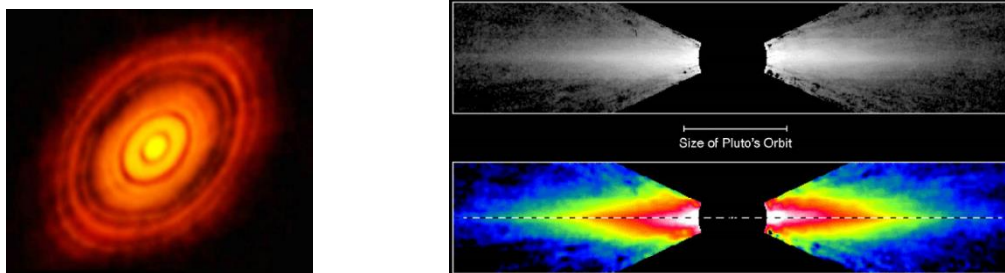


Рис. 5.7. (а) структура протопланетного диска с «Хаббла», (б) фотография газопылевого диска вокруг звезды Бета Живописца с ребра, фотография «Хаббла»

Тогда же на телескопе «Хаббл» сфотографировали **протопланетный диск с ребра** (рис. 5.7б). У  $\beta$  Живописца закрыли заслонкой саму звезду, и диск проявился. Верхняя фотография реальная, на нижней показан перепад яркости. Но это всё пыль, а где же планеты?

На рис. 5.8а показано, как мы видели на «Хаббле» сам протопланетный диск, из которого, может быть, что-то сформируется. А сейчас на наземных телескопах, прикрыв заслонкой яркую часть диска и саму звезду, стали обнаруживать на внутренней части протопланетного диска отдельные **планеты** (рис. 5.8б).

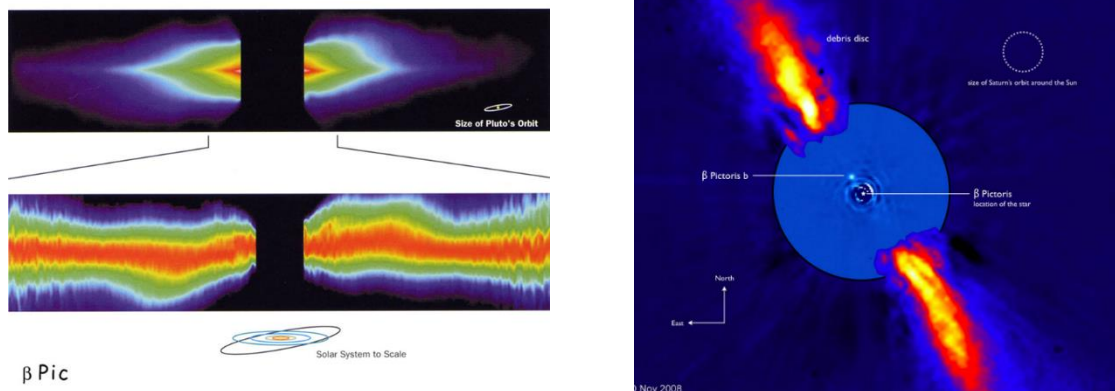


Рис. 5.8. (а) более чёткая фотография протопланетного диска  $\beta$  Pic, (б) современная фотография, на которой видны планеты

Рассмотрим следующий намёк на присутствие планет, теперь рядом со старыми звёздами. **Планетарные туманности** (рис. 5.9а) – это эпоха смерти звёзд средней массы, как наше Солнце. Звезда сбрасывает свои внешние слои. Так мы представляли планетарные туманности, пока не полетел телескоп «Хаббл». Дело в том, что с Земли они почти не различаются. Видно пятно, понятно, что это горячий газ, но структура не различима. «Хаббл» показал чёткие картинки.

Мы считали, что звезда – шар, и вещество она будет сбрасывать с себя сферически симметрично. Но «Хаббл» стал показывать планетарные туманности, которые имеют зеркальную симметрию и **биполярную структуру** (рис. 5.9б). Газ не летит в две другие стороны, потому что ему что-то мешает. Одна из очевидных идей – это плоскость

планетной системы с массивными планетами, либо в ней движется звезда-спутник (вертикальная). Они перехватывают газ и перенаправляют его своей гравитацией в другие стороны.



Рис. 5.9. (а) стандартная планетарная туманность, (б) фотография странной планетарной туманности, сделанная «Хабблом»

Наконец, в начале 90-х годов движение звезды, связанное с присутствием планеты, попытались заметить спектроскописты. Но здесь уже движение не в плоскости неба, а вдоль луча зрения по **эффекту Доплера** (рис. 5.10а). Это тоже казалось почти безнадежной идеей. Например, возьмём Солнце и Юпитер. Юпитер летит по своей орбите со скоростью 13 км/с. Солнце движется синхронно с ним, но на расстоянии от масс, в 1000 раз меньшем (Солнце в 1000 раз массивнее Юпитера). Значит, Солнце оборачивается вокруг центра масс системы Солнце-Юпитер со скоростью 13 м/с (рис. 5.12б).

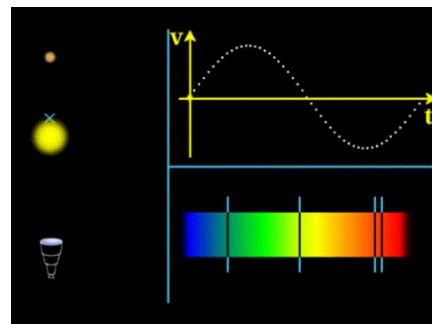
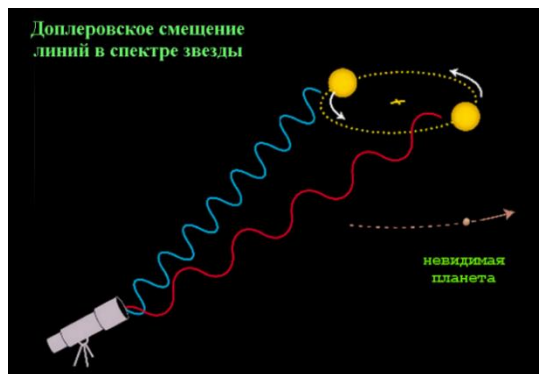


Рис. 5.10. (а) – доплеровское смещение линий в спектре звезды, (б) – решение задачи для Солнца

Заметить **сдвиг спектральных линий** на такое маленькое значение очень сложно. В ту эпоху у спектроскопистов самым большим достижением было измерение скорости звёзд с точностью 1 км/с.

Однако спустя 10 лет эту задачу решили (рис. 5.10б). Получив цифровой спектр звезды, накладывали на него цифровую маску и специальными математическими методами пытались найти рассогласование.

В это время первые планетообразные тела открыли радиоастрономы. В радиодиапазоне совсем другая технология. В оптике мы не мерим частоту, а

раскладываем спектр и получаем положение спектральных линий. А в **радиоастрономии** очень точно измеряется частота приходящего сигнала.

А. Wolszczan работал на 300-метровом телескопе и заметил у пульсара систематический **сдвиг момента прихода сигнала** (рис. 5.11а), его коллега D. Frail подтвердил это на другом телескопе, и в 1992 г. они опубликовали, что этот пульсар движется так, будто вокруг него 3 (или 4, но это не подтвердилось) объекта планетной массы.

Но хоть они и похожи по массе и размеру на наши планеты, было непонятно, **откуда могут быть планеты у нейтронной звезды**. Нейтронная звезда – это радиопульсар, остаток взрыва сверхновой. Предок радиопульсара – большая звезда с массой 10–15 масс Солнца. А масса пульсара около 2 масс Солнца, то есть в момент взрыва большую часть массы сверхновая выбрасывает, и вещество разлетается с огромной скоростью.

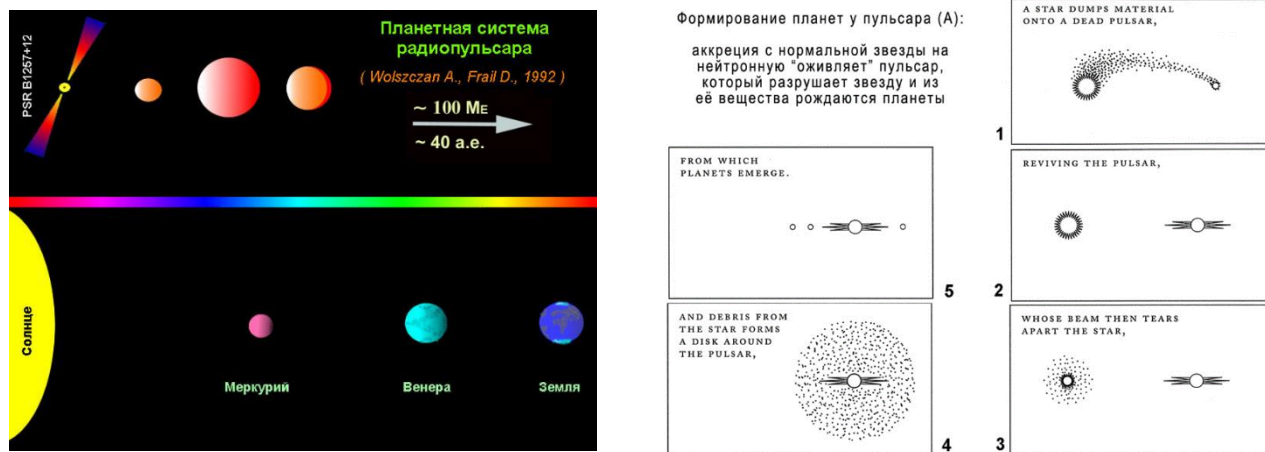


Рис. 5.11. а) планетная система радиопульсара, б) формирование планет у пульсара

Если планеты вращались по круговой орбите, а звезда вдруг потеряла 3/4 массы, круговая скорость станет гиперболической, и они разлетятся (рис. 5.11б). И сейчас учёные думают, откуда они там. Понятно, что это не нормальные планеты, а вещество, сброшенное звездой, но не до конца улетевшее от неё. Есть идеи про сброшенное и вернувшееся вещество, есть про второй спутник, который был нагрет и разрушен пульсаром.

На сегодняшний день **ещё у двух радиопульсаров** обнаружены такие объекты, а всего радиопульсаров обнаружено около трёх тысяч, так что это редкое сочетание условий.

Оптические спектроскописты продолжали свою работу. В 90-е годы ведущей группой были P. Butler и G. Marcy, они первыми создали спектроскопический комплекс и стали искать что-то тяжёлое типа Юпитера рядом со звёздами солнечного типа, что раскачало бы звезду, и в её спектре это проявилось бы доплеровским смещением линий. Как мы помним, Юпитер делает оборот за 12 лет, и надо два оборота, чтобы убедиться,

что это регулярное перемещение. Данные учёные стали наблюдать сотни звёзд, рассчитывая, что лет через 20 у некоторых из них проявится **эффект Юпитера**. Они представляли себе все планетные системы как нашу: гиганты вдали, поэтому вращаются медленно.

Ещё одна группа учёных – М. Майор и Л. Кёло – работала в обсерватории Хот-Прованс. У них был телескоп с диаметром всего лишь 1,93 м (рис. 5.12а), спектрограф был отдельно в помещении, где нет перепадов температуры. Они нашли ту звезду, которая продемонстрировала **систематическое доплеровское смещение** линий, причём с неожиданно большой амплитудой – 60 м/с, и объявили об **открытии первой экзопланеты**. А примерно через год первая группа учёных стала открывать уже много экзопланет.

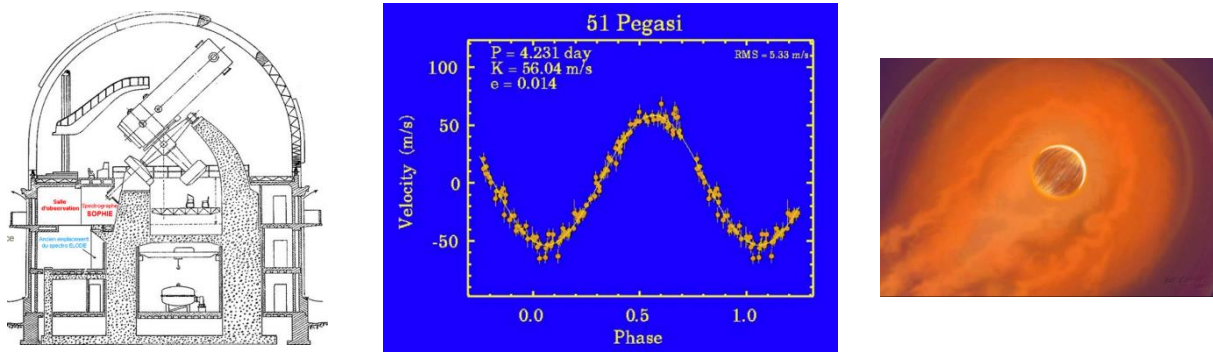


Рис. 5.12. а) 1,93-м телескоп, б) кривая лучевых скоростей 51 Peg, (б) испарение атмосферы планеты рядом с 51 Peg

На рис. 5.16б представлена первая **кривая лучевых скоростей**. Ещё интереснее, чем большая амплитуда, её период, составляющий не годы, а дни. В Солнечной системе самой быстро обращающейся планетой является Меркурий, и у него период несколько месяцев, а здесь крупная планета типа Юпитера облетает свою звезду за 4 дня. Из этого сразу следует вывод, что она настолько близко к звезде, что звёздный свет должен нагревать её до невероятной температуры. Отсюда родился термин «**горячие Юпитеры**» – масса как у планеты-гиганта, а температура тысячи кельвинов.

Это сложно понять. Юпитер мог сформироваться только в холодных условиях, где много летучих элементов в виде снега и льда, за снежной линией, а здесь совсем рядом со звездой. 51 Peg настолько близко, что её атмосфера испаряется, и от неё тянется хвост, как у кометы (рис. 5.12в).

Теоретики стали моделировать **динамику атмосферы** у таких горячих Юпитеров. Если он близко к звезде, значит, он должен быть приливно захваченным, то есть на звезду всегда смотрит только одно полушарие (рис. 5.13а). Значит, одно полушарие нагревается, горячая атмосфера отекает, накручивается на полюса. Это похоже на динамику атмосферы Венеры (рис. 5.13б).

К тому же, приливное трение заставляет такие близкие к звезде планеты довольно быстро тормозиться и падать на свои звёзды.

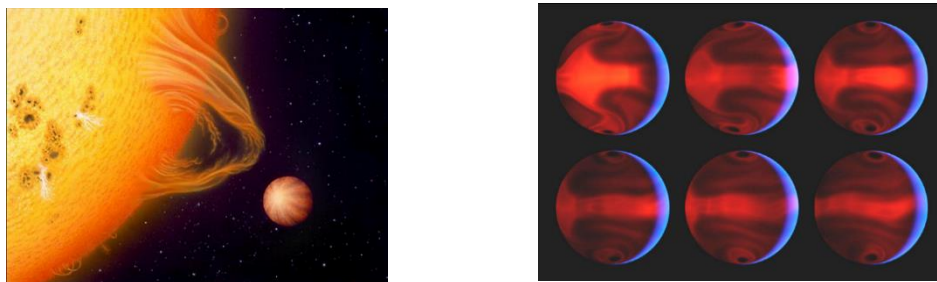


Рис. 5.13. (а) приливный захват горячего Юпитера, (б) его динамика атмосферы

### Современные методы открытия и изучения экзопланет

Теперь поговорим о том, как мы узнаём что-то о планетах. Мы видим только звезду и её доплеровские колебания. У звезды можно померить спектр (рис. 5.14), по нему, глядя на главную последовательность, узнаём светимость звезды. Затем идём к давно полученной зависимости между светимостью и массой звезды главной последовательности и находим массу звезды. То есть уже знаем массу звезды, а также период и амплитуду её колебаний.

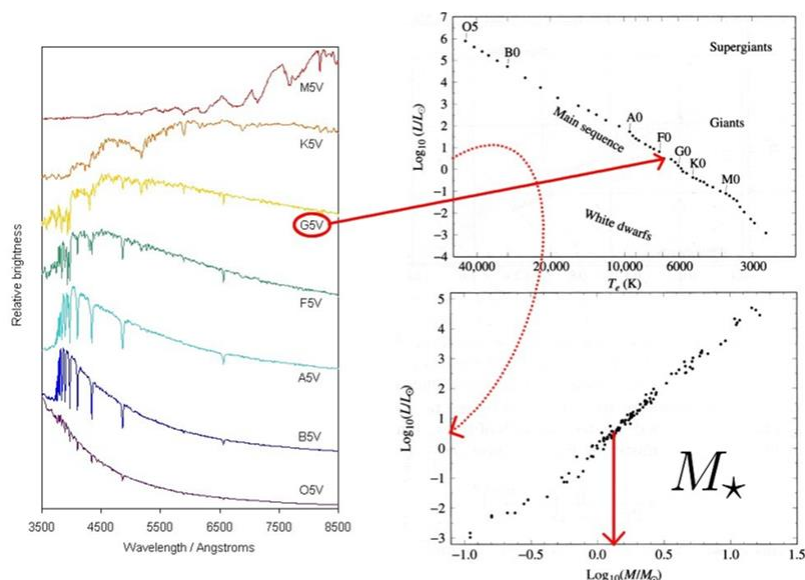


Рис. 5.14. Определение массы, периода и амплитуды колебаний звезды

Дальше по периоду колебаний, а значит, по орбитальному периоду планеты, и массе звезды (3 закон Кеплера) узнаём размер орбиты планеты (рис. 5.15). Дальше по массе звезды и размеру орбиты (1-я космическая скорость) узнаём орбитальную скорость планеты. А орбитальную скорость звезды мы измерили – это амплитуда её доплеровского смещения с точностью до наклона плоскости орбиты (если смотрим на орбиту с ребра, звезда движется от нас к нам, а если с плоскости, доплеровского смещения вообще не увидим).

Затем закон сохранения импульса говорит нам о том, что произведение массы звезды на скорость звезды равно произведению массы планеты на скорость планеты.

Отсюда узнаём **скорость планеты** с точностью до наклона орбиты. Мы получили оценку массы планеты только из наблюдений за звездой.

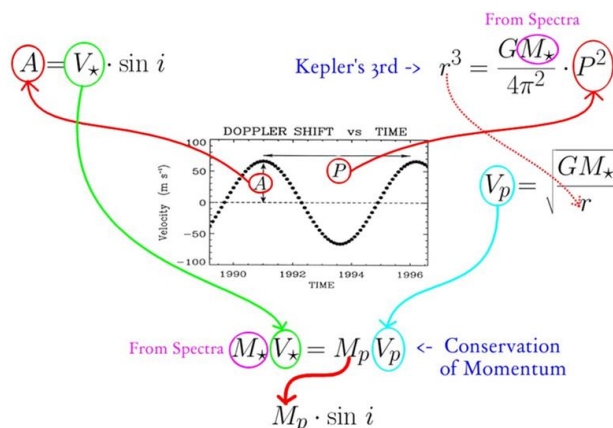


Рис. 5.15. Определение размера орбиты, орбитальной скорости планеты, массы планеты

А если плоскость будет направлена на нас, **планета** будет время от времени **проходить на фоне звезды** (рис. 5.16а). Эти прохождения будут менять видимую яркость звезды, и мы сможем померить **диаметр планеты**, т. к. знаем диаметр звезды: мы узнаём температуру звезды по спектру, мерим поток излучения (светимость), и по ним определяем площадь поверхности, а значит, размер звезды.

У данных **затмений** очень маленькая глубина. Пусть на фоне Солнца проходит Юпитер. Его диаметр в 10 раз меньше диаметра Солнца, а площадь в 100 раз, то есть 1/100 звёздной величины. Так как основание звёздных величин близко к числу  $e$ , малые числа у них одинаковые. Примерно в 1/100 глубина затмения и получается. Заметить с Земли колебание блеска звезды с ошибкой меньше 1/100 можно только в горных обсерваториях при хорошем качестве атмосферы, а в космосе довольно легко.

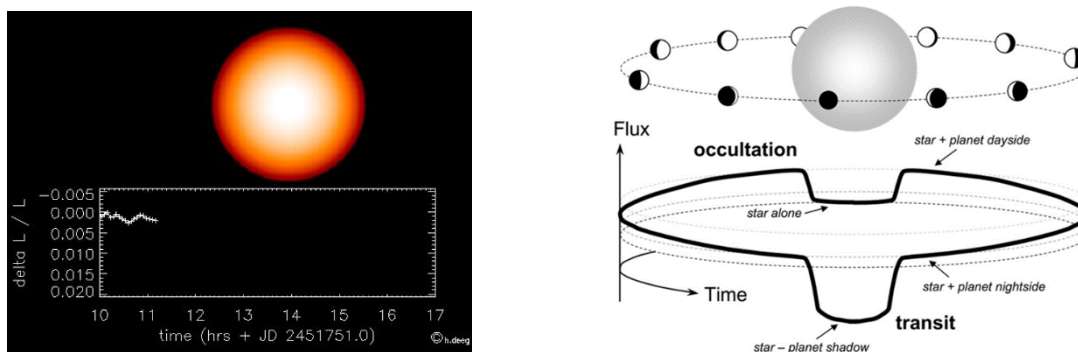


Рис. 5.16. а) прохождение планеты на фоне звезды, б) процесс изменения яркости звезды при движении планеты вокруг неё

Там можно будет заметить не только затмения, но и **свет самой планеты**, когда она заходит за звезду. Это сложнее, планета прикрывает такой же кусочек на поверхности звезды, какого размера она сама, но на звезде он яркий, а планета нет.

На рис. 5.16б показано в общем виде, как происходит **изменение яркости звезды**, когда вокруг неё движется планета. Мы видим глубокое затмение, когда закрыт кусок звёздной поверхности, не такое глубокое затмение планеты, и медленное изменение яркости, потому что к нам поворачивается дневная сторона планеты.

Космический телескоп **COROT** (Франция, 2007) имеет объектив 30 см в диаметре, но в космосе измеряет яркость звёзд с точностью до десятитысячных долей звёздной величины (рис. 5.17а). **Звезда сама может вибрировать**, и это помогает понять, какие звуковые волны выходят из её недр. Также этот телескоп открыл несколько десятков экзопланет. Он запускался нашей ракетой «Союз».

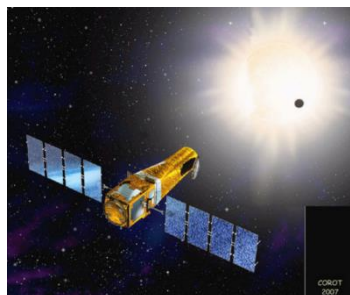


Рис. 5.17. (а) COROT, ракета «Союз», (б) Kepler

А американцы запустили большой фотометрический телескоп **«Kepler»** (Nasa, 2009) (рис. 5.17б) для измерения яркости звёзд. Диаметр его зеркала почти метр, у него комплект ПЗС-матриц и огромное поле зрения – по масштабам наземных телескопов 10 на 10 градусов. Значит, это Шмидтовский телескоп. На рис. 5.18а представлена его ПЗС-матрица, в которой использован эффект кривизны поля, она обрабатывает поверхность наилучшего изображения.

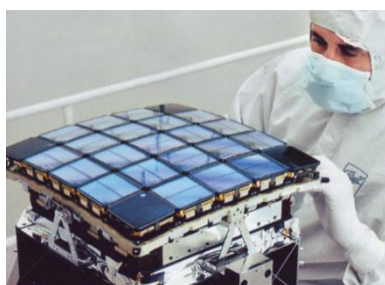


Рис. 5.18. (а) – ПЗС-матрица телескопа Kepler, (б) – участок неба, на который он отправлен

Область, на которую направили этот телескоп, захватила созвездия Лебедя и Лиры (рис. 5.18б). Также туда попал Млечный путь, но в нём много звёзд и они очень тесно расположены, поэтому их фотометрию очень сложно проводить. А в части вне Млечного пути звёзд меньше, зато они расположены реже. Так этот телескоп в течение нескольких лет фотометрировал примерно 200 тыс. звёзд, и пошла череда открытий.



На рис. 5.19 представлена статистика открытия экзопланет. Первая была открыта в 1995 г., а 9 марта 2022 года их было уже 4983. В последние 3 года каждые 1,5 дня открывалась новая планета.

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
9 марта 2022	4983

Рис. 5.19. а) статистика открытия экзопланет, б) состав экзопланет

Что мы о них знаем? Массу планеты определяем по лучевой скорости, размер – если она проходит на фоне звезды. Можно нанести точки обнаруженных экзопланет на плоскость (рис. 5.20), и на неё же нанести теоретические линии того, какой размер имеет тело данной массы, состоящее из чистого железа. Видно, что есть планеты, на это претендующие. Есть планеты, состоящие из железа и минералов (типа Земли), из чистой воды, из чистого водорода и гелия. С ростом массы планеты становятся от землеподобных гигантоподобными, но разброс огромный.

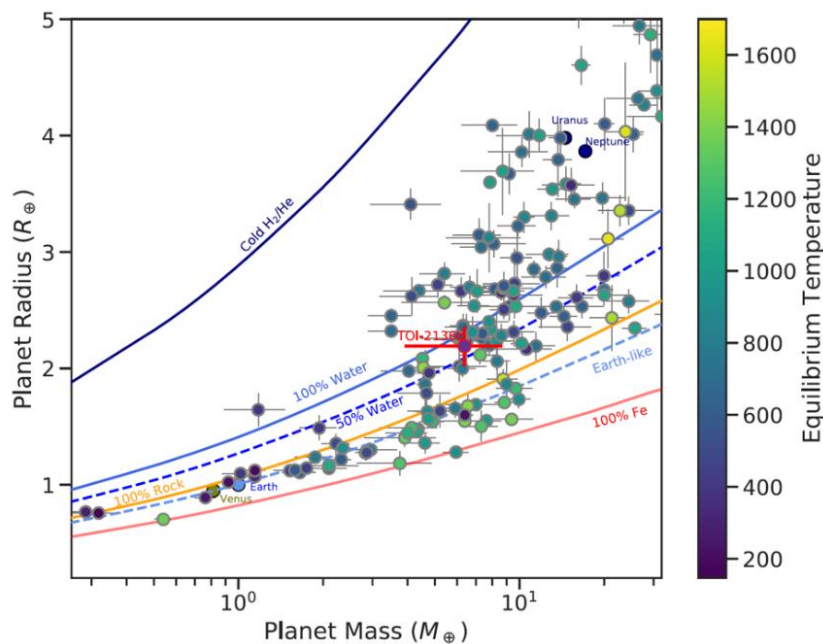


Рис. 5.20. Состав экзопланет

Также на рисунке отмечены температуры планет. Их вычислить несложно: мы знаем, какая звезда, на каком расстоянии от неё планета, поток тепла от звезды известен.

Аппараты, которые способны регистрировать либо смещение звезды (астрометрические спутники), либо изменение яркости звезды, все время улучшаются (рис. 5.21).

Последние два аппарата были запущены несколько лет назад. Кеплер очень хорошо поработал, но он смотрел на один кусочек неба размером 10 на 10 градусов, то есть покрыв 100 квадратных градусов. А вся небесная сфера – почти 41 тыс. квадратных градусов. Надо исследовать тем же методом всё небо.

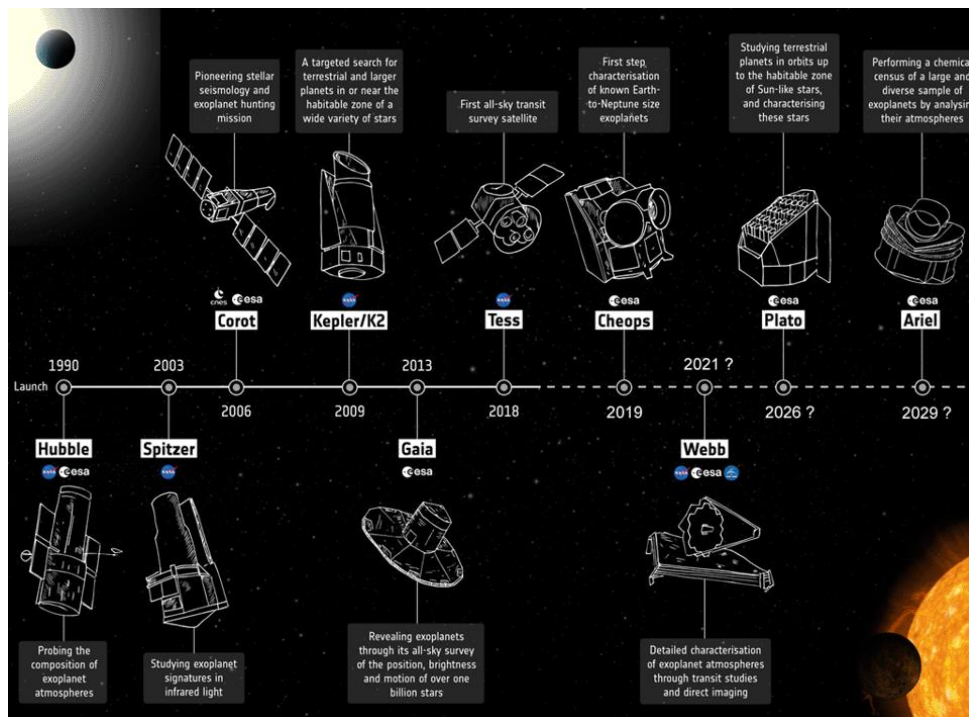


Рис. 5.21. Астрометрические спутники

В 2018 г. полетел **TESS** (рис. 5.22а) – американский спутник для обзоров прохождения транзитных экзопланет. У него 4 телескопа, у каждого поле зрения 24 на 24 градуса, и он за год обзорекает всю небесную сферу. Быстрее он это делать не может, потому что не может смотреть в ту область неба, где сейчас находится Солнце. А оно перемещается по эклиптике и через полгода будет в другой области неба.



Рис. 5.22. (а) TESS, (б) CHEOPS, (в) JWST

Ещё есть европейский **CHEOPS**, у него один телескоп примерно такого же качества (рис. 5.22б).

Они ищут большое количество новых экзопланет, потому что это интересно, а также они готовят материал для работы **JWST** (рис. 5.22в). Он уже на орбите, зеркало (18 сегментов, 6,5 м) открылось, его сфокусировали, оно уже даёт чёткие дифракционные

изображения звёзд. Но придётся подождать 2–3 месяца, чтобы оно остыло: у бериллия, из которого оно сделано, небольшой коэффициент теплового расширения, плюс он прикрыт от солнечных лучей, но всё равно нужно время, чтобы оно остыло до температуры нескольких кельвинов. Телескопу инфракрасного диапазона нужно самому быть холодным, чтобы регистрировать инфракрасные лучи от далёких объектов. У него постоянно корректируют фокусировку, там 150 моторчиков, которые двигают панельки. К июню он выйдет на стационарный режим и сможет исследовать детально те экзопланеты, которые подготовили.

В ближайшие годы европейцы хотят запустить **PLATO** (рис. 5.23а). Там 26 телескопов, они маленькие (120 мм), но зато суммарное поле зрения колоссальное, и он сможет работать по большим областям неба.



Рис. 5.23. (а) PLATO (2026?), (б) ARIEL (2029?)

Ещё собираются запустить европейский **ARIEL** (рис. 5.23б), у него один объектив, но размером 1,1 на 0,7 м.

Но планеты надо не только открыть и измерить, но и понять, какие **условия на поверхности**. Для этого можно использовать эффект, когда планета проходит на фоне звезды, свет звезды проходит через верхние слои планетной атмосферы. Это называют **эффектом Ломоносова**, потому что М. В. Ломоносов в 1761 г. таким образом открыл атмосферу у Венеры (рис. 5.24а). Это уже довольно яркий свет, который может что-то сообщить про химический состав планетной атмосферы.

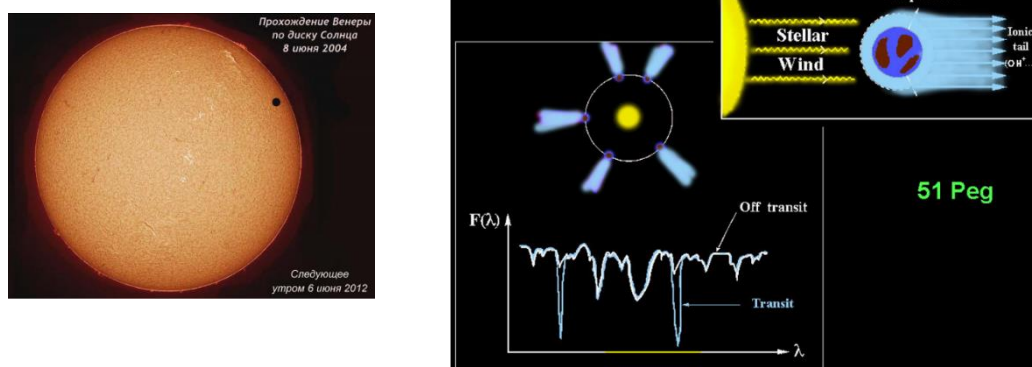


Рис. 5.24. (а) прохождение Венеры по диску Солнца в 2004 г., (б) атмосфера планеты у звезды 51 Peg

Например, у первой открытой звезды, 51 Peg, атмосфера вообще улетает, как у кометы, и на просвет её видно очень хорошо. Там в спектре появляются линии металлов, воды и т. д. (рис. 5.24б).

Сегодня есть разные **методы обнаружения и изучения экзопланет**. О радиальных скоростях (эффekte Доплера) мы уже говорили. **Астрометрический** метод пока не даёт результаты, но, когда накопится критическая масса наблюдений, даст. **Транзитный** метод работает очень хорошо, и сейчас это главный метод обнаружения экзопланет. Есть ещё второстепенные методы, например, микролинзирование, когда более близкая от нас звезда преломляет лучи света более далёкой. Если у близкой рядом есть планета, то преломление будет сложной формы. Ещё есть прямое фотографирование, были случаи, когда с его помощью замечали очень далёкую от звезды планету.

Рис. 5.25 каждый два года обновляет М. Перельман – один из самых активных исследований экзопланет, также он выпускает справочник экзопланет. На рисунке видно, какие есть методы обнаружения экзопланет, и сколько каким открыто. По радиальным скоростям около 1000, а транзитным в сумме примерно 3500. И каждый из этих методов даёт свои характеристики планеты.

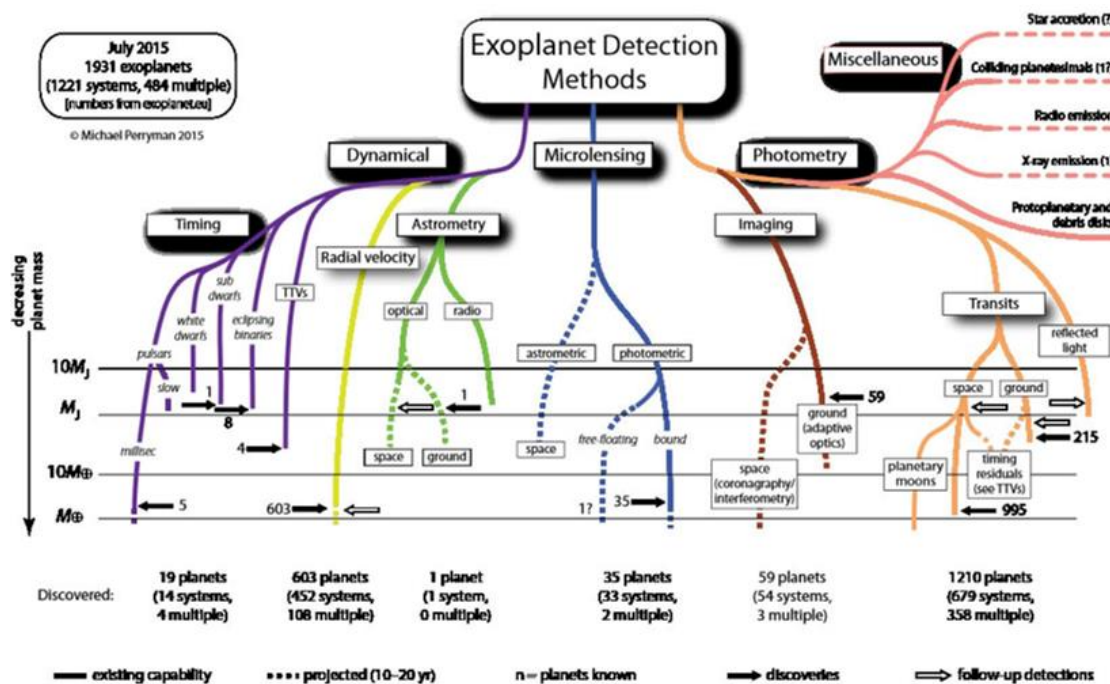


Рис. 5.25. Методы обнаружения экзопланет

**Прямые изображения** – очень трудная работа. В телескопе «Хаббл» однажды удалось прикрыть Fomalhad чёрной заслонкой, увидеть вокруг него пылевое кольцо и там разглядеть маленькую экзопланету (рис. 5.26а).

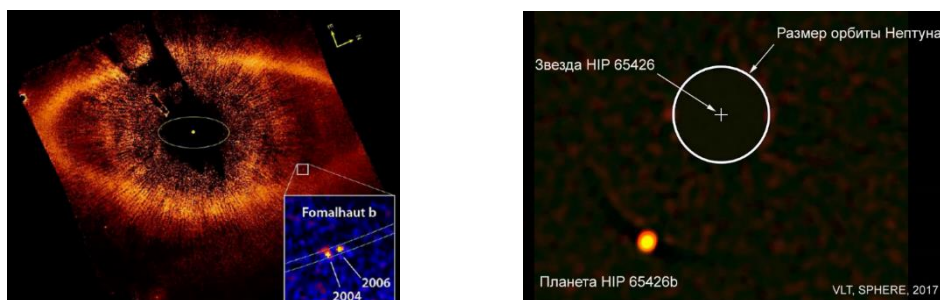


Рис. 5.26. (а) протоспутниковое кольцо, (б) область, в которой нельзя увидеть планеты, закрыв свет звезды

Тогда были уверены, что открыли гигантскую экзопланету, но сейчас уже не уверены. Там что-то движется, за перемещениями по орбите проследили, но для изображения планеты оно слишком яркое. Мы говорили, что, если даже на Юпитер добавлять вещество, он станет чуть больше, а потом начнёт уменьшать свой размер. Так что планет намного крупнее Юпитера в природе быть не может. Сейчас предполагается, что это протоспутниковое пылевое кольцо, то есть спутники вокруг планеты ещё не сформировались, но вещества там много, и оно отражает много света своей звезды.

Сейчас разная современная аппаратура позволяет вообще **выключить свет звезды и увидеть свет планеты** (рис. 5.26б). Есть разные методы: заслонка, но она многого не даёт, и др. Но, как правило, такое работает для далёких планет. Мы закрыли звезду, но область размером с орбиту Нептуна. Если бы это была Солнечная система, все планеты до него мы бы не увидели. А именно их и хочется рассмотреть, потому что там тепло, они могут быть пригодными для жизни.

На рис. 5.27а показано, как у звезды HR 8799 почти потушили изображение звезды. Для этого на исходную фотографию наложили негатив изображения такой же звезды, но не имеющей планет. Обнаружили три гигантские планеты. А когда со временем научились её тушить ещё лучше, обнаружили ещё одну и увидели, как они **движутся по орбите** (рис. 5.27б), что подтвердило их планетарную природу. Но пока все обнаруженные планеты очень далеко от звезды.

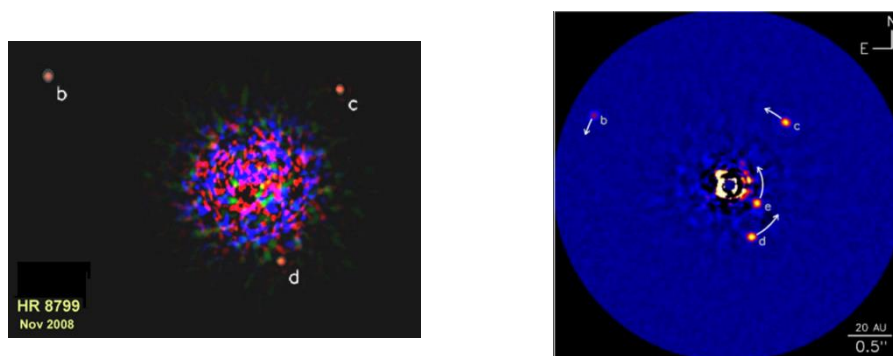


Рис. 5.27. (а) – планеты у звезды HR 8799, (б) – их движение по орбите

Изучить **область землеподобных планет** можно, например, с помощью **интерферометрических методов** (рис. 5.28а). Берём два телескопа, складываем их свет

от одного источника, получаем изображение источника в виде интерферометрической картины, максимумы и минимумы. То же самое изображение мы получим от планеты, но планета не в центре звезды, она смещена, значит, интерферометрическая картинка от планеты смещена, и мы можем подобрать расстояние между телескопами так, чтобы максимумы излучения от планеты попали на минимумы излучения звезды. Это даёт шанс выделить свет планеты.

Лучше, чтобы это делал **космический интерферометр**, причём имеющий не два зеркала, а четыре (рис. 5.28б). Такой проект есть, но он стоит очень дорого.

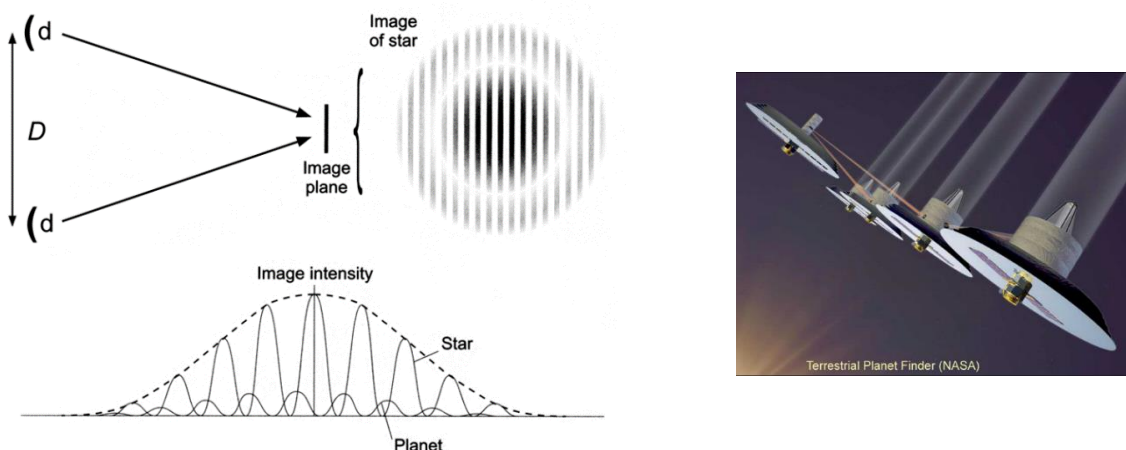


Рис. 5.28. (а) интерферометрический методы, (б) проект космического интерферометра

А на рис. 5.29 представлен похожий проект, но более дешёвый. Выводим на орбиту телескоп, от которого отделяется часть, раскрывается, получается экран (рис. 5.29а) с точно рассчитанной формой края, которая не даёт вторичных колец в дифракционном изображении звезды (рис. 5.29б). Телескоп смотрит, а этот экран отлетает далеко и закрывает собой яркую звезду (рис. 5.29в). Тогда можно будет увидеть отдельные планеты.

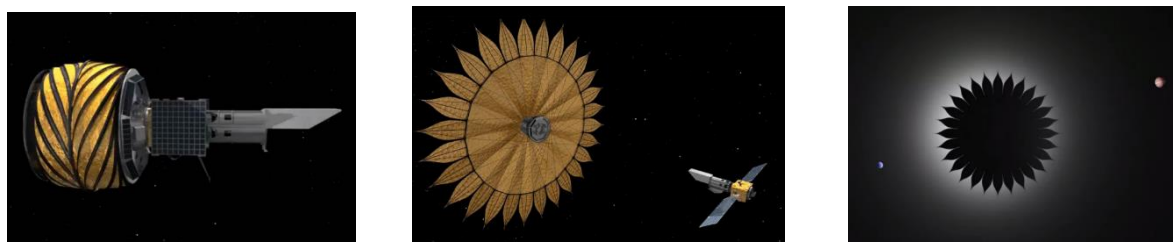


Рис. 5.29. Проект космического интерферометра HabEx

Тогда есть надежда увидеть в спектре планеты линии молекул, **биомаркеры**, которые связаны с жизнью по крайней мере земного типа (рис. 5.30).

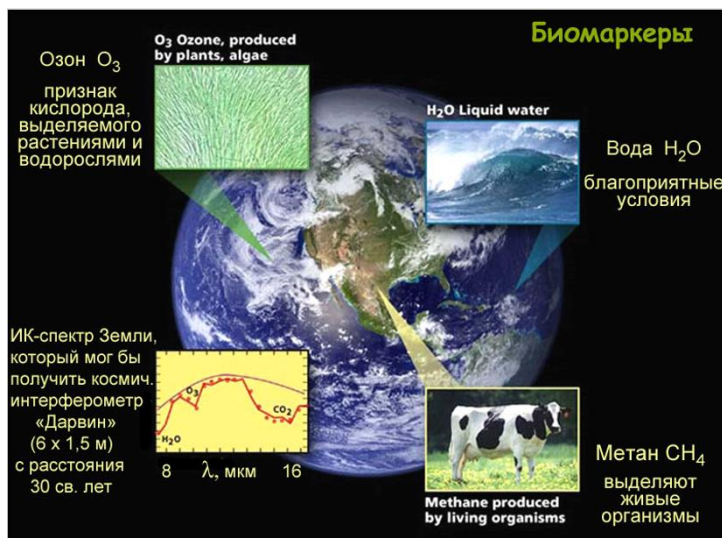


Рис. 5.30. Биомаркеры

Планетные системы, подобные Солнечной, уже обнаружили, например, **Kepler-90** (рис. 5.31). Видно почти точное соответствие нашей планетной системе: гиганты вдали, землеподобные планеты близко к звезде.

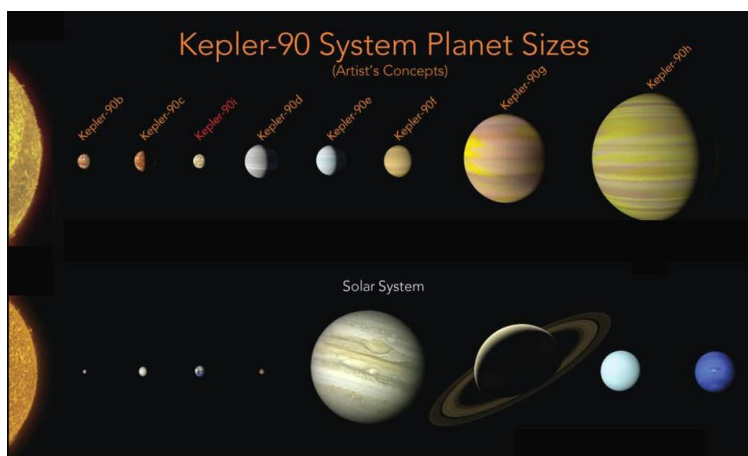


Рис. 5.31. Сравнение Солнечной системы и планетарной системы Kepler-90

Есть надежда, что года через два начнёт работать гигантский сорокаметровый телескоп **E-ELT** (рис. 5.32a) в Чили. Он сможет получать спектры экзопланет, потому что большой диаметр объектива позволит собирать много света и отделять свет планеты от света звезды.

Ю. Мильнер совместно со С. Хокингом в 2016 г. объявил о начале реализации проекта по разработке флота межзвёздных зондов, использующих **световой парус** (рис. 5.32б). Маленький космический аппарат привязан к светоотражающей поверхности (оптическому парусу), на него световым давлением давит лазерный луч и разгоняет его до 0,8 скорости света. Но проблема состоит в том, что для нужного давления мощность лазерного луча должна составлять гигаватты, и они должны падать на 10 квадратных метров поверхности паруса. Если парус не будет отражать весь падающий свет, он очень

быстро испарится. Сейчас пытаются создать вещество, которое обладает идеальным зеркальным свойством.

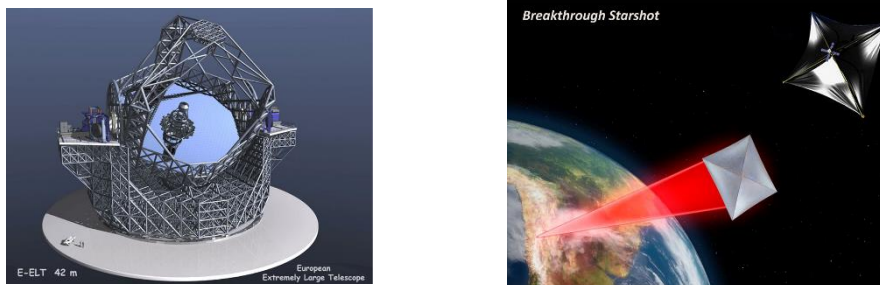


Рис. 5.32. а) 40-м телескоп E-ELT, б) проект космического аппарата со световым парусом

Но и от экзопланет к нам могут прилетать **объекты**. Первым объектом, прилетевшим в Солнечную систему из-за её пределов, был астероид **Оумуамуа** (рис. 5.33а). За ним прилетела **межзвёздная комета**, которую открыл Геннадий Борисов (рис. 5.33б).



Рис. 5.33. (а) – астероид Оумуамуа, (б) – межзвёздная комета Borisov, в) первый межзвёздный болид

Также иногда в атмосфере Земли бывают замечены **метеориты** с такими скоростями, что они явно межзвёздного происхождения (например, в 2014 г. влетел объект размером 0,5 м со скоростью 44 км/с) (рис. 5.33в).



## Лекция 6. Звёзды

### Наблюдение, обозначение, каталоги звёзд

Наблюдением звёзд занялись довольно поздно, первые телескопы не обращали на них внимание. Галилей посмотрел на Млечный путь, увидел, что там много звёзд, и на этом закончил их изучение. Потом были хорошие телескопы, но с очень маленьким полем зрения. Они были однолинзовыми, длинный фокус позволял убрать хроматизм и сферическую абберацию. Из-за маленького поля зрения можно было увидеть всего одну звезду, и астрономы занимались в основном планетами, открывали спутники и кольца у Сатурна.

Звёздная астрономия началась с телескопа, изображённого на рис. 6.1а – рефлектора У. Парсонса (лорда Росса). У него уже было большое поле зрения, но, главное, настолько большой объектив (182 см), что даже при маленьком поле зрения можно было получить большое количество слабых звёзд. У данного телескопа была огромная светосила – количество собранного света, делённое на размер поля зрения. Поле зрения растёт с фокусным расстоянием, и в маленький объектив видно только яркие объекты. А это был первый телескоп, который позволил замечать далёкие звёзды даже в других галактиках. Он первым показал спиральную структуру галактик.

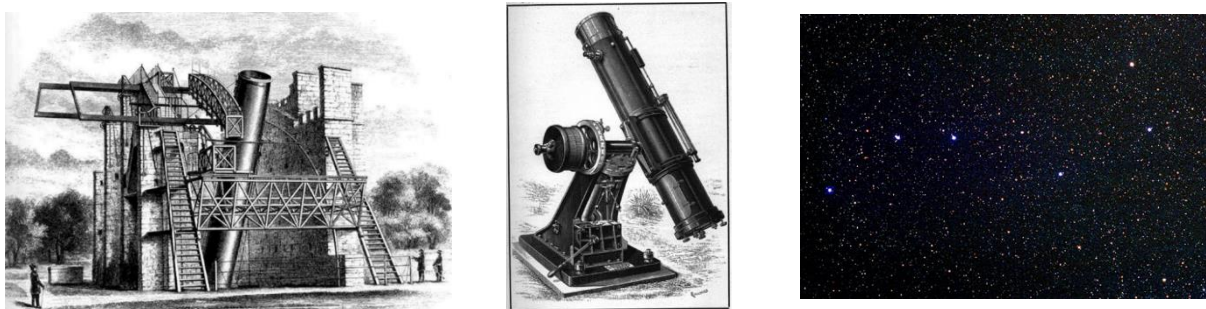


Рис. 6.1. (а) – рефлектор лорда Росса, (б) рефлектор Королевской обсерватории в Эдинбурге, экваториальная монтировка, апертура  $12\frac{1}{4}$  дюйма, в) звёзды, которых раньше не видели

Телескоп был **меридианный**, то есть при пересечении меридиана было максимально высокое расположение светил. Можно было немного передвигать по азимуту и высоте, осматривалась небольшая область неба. В телескопе была оптическая система Ньютона. Зеркала делались из спекулума – сплава олова и меди. Если его отполировать, он очень хорошо отражал, но быстро окислялся. Зеркало в данном телескопе весило 3 тонны, поэтому работали с ним недолго. Но оно впервые дало понять, что диаметр – важнейшая характеристика телескопа.

Дальше в середине 19 века придумали **химическую фотографию**. Теперь можно было не только наблюдать глазом, но и фиксировать изображение на фотопластинке. Но у первых фотопластинок была очень низкая чувствительность, экспозиции требовались от 3 часов до нескольких ночей. Значит, нужен был точно ведущий часовой механизм

для поворота вокруг полярной оси. Телескоп приобрёл современную форму (рис. 6.1б): часовой механизм, монтировка, труба, оптические элементы. С тех пор конструкция почти не менялась, только росла в размерах.

С тех пор начали фотографировать звёзды, появилось много звёзд, которые не видели ни до телескопов, ни в первые телескопы (рис. 6.1в). Теперь надо было как-то измерять их координаты, давать им обозначения, составлять каталоги.

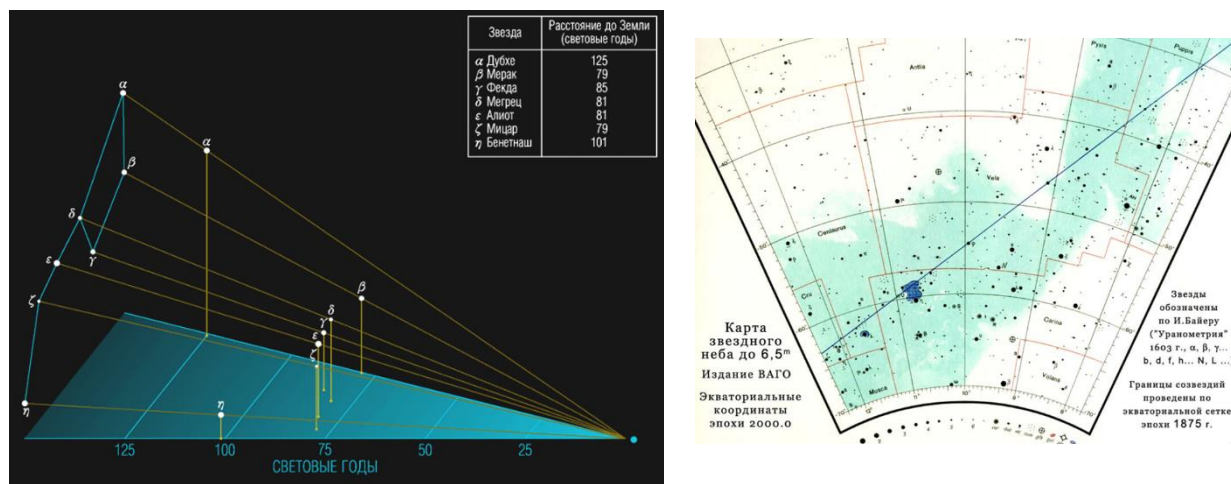


Рис. 6.2. а) звёзды в ковше Большой Медведицы, б) карта звёздного неба

**Первые телескопы** работали в основном в меридиане – смотрели на юг и наблюдали прохождение звёзд через небесный меридиан, так как астрономам было удобно немного передвигать телескоп по высоте, но не уводить его с меридиана. Они давали **номера звёздам**, которые одна за другой пересекали меридиан, и это сохранилось до нашего времени. Например, мы говорили, что первую экзопланету открыли у звезды 51 Peg.

Мы теперь понимаем, что обозначения не имеют никакого отношения к пространственному **расположению**. Хотя иногда бывают исключения (рис. 6.2а). Удивительно, что  $\beta, \delta, \gamma, \epsilon, \zeta$  – фактически родственники, тогда как  $\alpha$  – случайные звёзды в ковше.

**Каталоги** обычно делают на белом фоне чёрными звёздами (рис. 6.2б). На фотопластинке после её обработки химическими средствами получается негатив, а это истинное негативное изображение звёзд. Такое было удобно для астрономов и тех, кто печатал карты неба в типографии (при заливке всего листа чёрной краской было сложно оставить маленькое белое пятнышко из-за эффекта растискивания). С переходом на работу на компьютерах эта проблема пропала, один светлый пиксель всегда можно оставить.

**Имена звёзд** пришли к нам от греков и от арабов. Ими иногда пользуются даже в научных работах (исследуя Сириус, его никто не называет  $\alpha$  Большого Пса). Собственных имён звёзд примерно 330, они указаны в каталогах, исторических справочниках, но уже не особо нужны

У многих звёзд есть целый **набор обозначений** в разных каталогах. В базе данных SIMBAD есть кросс-корреляции, то есть входя с любым именем звезды или внегалактического объекта, получаешь полный список её имён и обозначений из всех опубликованных каталогов.

**Международному астрономическому союзу** поручили давать звёздам имена и следить за тем, чтобы другие не давали альтернативные имена тому, что находится за пределами Земли.

Есть **четыре основных принципа**, на которых ещё недавно стояла комиссия по **именованию небесных объектов**. Звёздам и галактикам имена (личные) не дают, обозначают номером в каталогах. Планетам дают мифологические имена. Но когда это правило устанавливалось, не предполагали, что где-то раз в 1–2 суток будут открывать новую планету за пределами Солнечной системы. Кометам дают имена первооткрывателей, потому что они могут стать видимыми на неделю или две и уйти на тысячелетия, и это стимулирует любителей за ними наблюдать. Астероидам дают имена выдающихся людей по предложению первооткрывателей. У них не такая вытянутая орбита, как у комет, не открыли в этот раз, заметят в следующий.

В 2019 и 2020 гг. открыли два **объекта**, прилетевших **из межзвёздного пространства**. Один – астероид **Оумуатиа** (рис. 6.3а), название которого обозначает «первый объект издалека» на языке гавайских аборигенов (телескоп, открывших объект, стоит на Гавайских островах). Второй – комета, названная **Borisov** (рис. 6.3б), которую открыл сотрудник ГАИШ Г. Борисов с помощью самодельного телескопа диаметром 1 м.

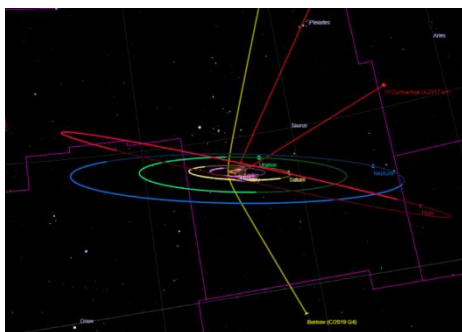


Рис. 6.3. (а) траектория астероида *Оумуатиа* и кометы *Borisov* (жёлтая), (б) межзвёздная комета *Borisov*

Раньше отрывали примерно по одной планете в век (Меркурий, Венера, Юпитер, Сатурн были известны ещё древним грекам, в конце 18 в. был открыт Уран, в середине 19 в. Нептун, в середине 20 в. Плутон), и у астрономов хватало мифологических имён, чтобы давать им названия. А с 1995 г. стали открывать **экзопланеты** и **экзопланетные системы**.

Профессионалы сразу придумали им **обозначения** (рис. 6.4а). 55-я звезда Рака (Сnc), а – сама звезда, дальше b, c, d и т. д. по алфавиту обозначали планеты в этой

системе по порядку открытия. А у астрономов-любителей появилось желание давать им имена, но Международный астрономический союз сначала это не поддержал.

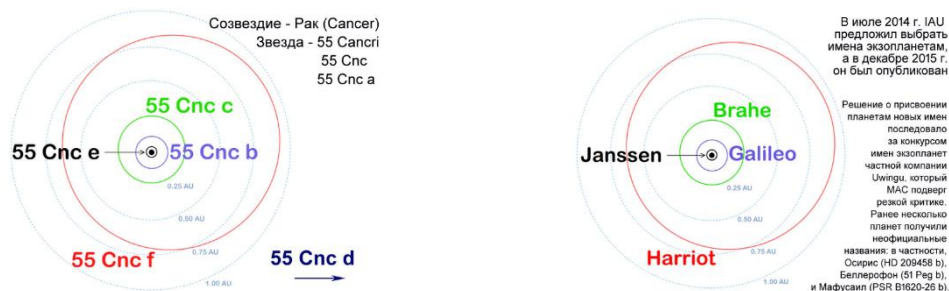


Рис. 6.4. (а) обозначения экзопланет 55-й звезды Рака, (б) данные им имена

Однако желание у людей было, и в 2014 г. IAU предложил выбирать **имена** экзопланетам. Сначала вспомнили, что есть много людей, причастных к астрономии, в честь которых ничего не было названо. В системе 55-го Рака звезду и планеты развали в честь тех, кто причастен к изобретению телескопа (рис. 6.4б). Г. Галилей изобрёл телескоп, Т. Браге работал в эту же эпоху. Янссен впервые сложил два стекла и сделал подзорную трубу, а Т. Хэрриот сделал телескоп одновременно с Галилеем, довёл его увеличение примерно до 30 раз и тоже увидел кратеры на Луне и т. д., но книг про это не написал. Также экзопланеты называли именами арабских астрономов (Saffar, Samh, Majriti).

Также люди давали планетам имена из мифологий и религий разных стран, географические названия, имена серийных литературных персонажей. Надо было наложить на это какую-то систему. В 2019 г. родилась инициатива **IAU NameExoWorlds**.

Другие люди стали говорить, что астрономы злоупотребляют своими именами: например, на карте Луны почти все кратеры названы в честь астрономов или учёных от Средних веков до наших дней, а надо расширять географию. На рис. 6.5а представлена **таблица имён звёзд**, в которых фигурируют **астрономы**.

ЗВЕЗДА Астроном	$\alpha_{2000.0}$ $\delta_{2000.0}$	Обозначения, характеристика V – звездная величина
Гранатовая звезда Гершеля Herschel W. (1738-1822)	21 <sup>h</sup> 43,6 <sup>m</sup> +58° 47'	$\mu$ Сер. Холодный темно-красный сверхгигант. V = 4,1 <sup>m</sup>
Летящая звезда Барнарда Barnard E. E. (1857-1923)	17 <sup>h</sup> 57,9 <sup>m</sup> +4° 41'	Звезда с наибольшим собственным движением. V = 9,5 <sup>m</sup>
Звезда Каптейна Kapteyn J.C. (1851-1922)	5 <sup>h</sup> 11,2 <sup>m</sup> +45° 01'	Звезда со вторым по величине собственным движением. V = 8,8 <sup>m</sup>
Звезда ван Маанена van Maanen A. (1884-1946)	0 <sup>h</sup> 49,0 <sup>m</sup> +5° 23'	Ближайший одиночный белый карлик V = 12,4 <sup>m</sup>
Звезда Кшеминского Krzeminski W.	11 <sup>h</sup> 21,3 <sup>m</sup> -60° 37'	V779 Cen, Cep X-3. Затменная двойная с нейтронной звездой. V = 13,3 <sup>m</sup>
Звезда Пшибыльского Przybylski A. (1913-1986)	11 <sup>h</sup> 37,6 <sup>m</sup> -46° 43'	HD 101065. Звезда с необычным химическим составом. V = 8,0 <sup>m</sup>
Объект Сакураи Sakurai Y.	17 <sup>h</sup> 52,5 <sup>m</sup> -17° 41'	V4334 Sgr. Новоподобная (1996 г.), ядро планетарной туманности. V = 21+11 <sup>m</sup>
Объект Кувано Kuwano N.	20 <sup>h</sup> 21,2 <sup>m</sup> +21° 34'	PU Vul. Симбиотическая новоподобная (1977 г.). V = 17+9 <sup>m</sup>
Звезда Поппера Popper D.M.	14 <sup>h</sup> 15,0 <sup>m</sup> -46° 17'	HD 124448. Первая звезда с большим избытком гелия. V = 10 <sup>m</sup>
Звезда Лейтена Luyten W.J. (1899-1994)	7 <sup>h</sup> 27,4 <sup>m</sup> +5° 14'	BD+05°1668. Чрезвычайно маленькая звезда. V = 9,9 <sup>m</sup>
Звезда Тигардена Teegarden B.	2 <sup>h</sup> 53,0 <sup>m</sup> +16° 53'	SO 025300.5+165258. Ошибочно принята за третью звезду от Солнца. V = 15,4 <sup>m</sup>

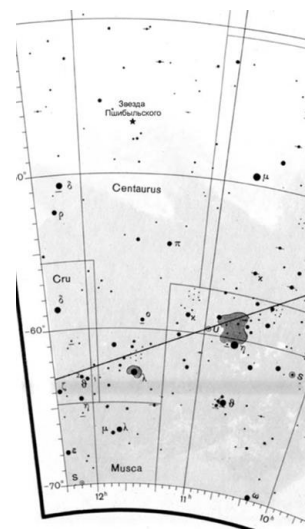


Рис. 6.5. а) звёзды, связанные с именами астрономов, б) звезда А. Пшибыльского

Данные имена есть в статьях, но их нет в списках, утверждённых Международным союзом. Это устная традиция, которая поддерживается в профессиональном кругу астрономов.

Например, А. Пшибыльский, занимаясь спектроскопией, открыл звезду восьмой величины и исследовал её спектр (рис. 6.5б). Он увидел там линии элемента гольмия, близкого к платине и золоту. До сих пор второй такой звезды не открыто.

### Изучение свойств звёзд

**Видимая звёздная величина** – это поток света, который мы получаем с Земли, он ничего не говорит об истинной светимости звезды (рис. 6.6б). Например, про звезду с рис. 6.6а нельзя сказать, яркая она, потому что мощная, или потому близко к нам, пока не измерим расстояние до неё.

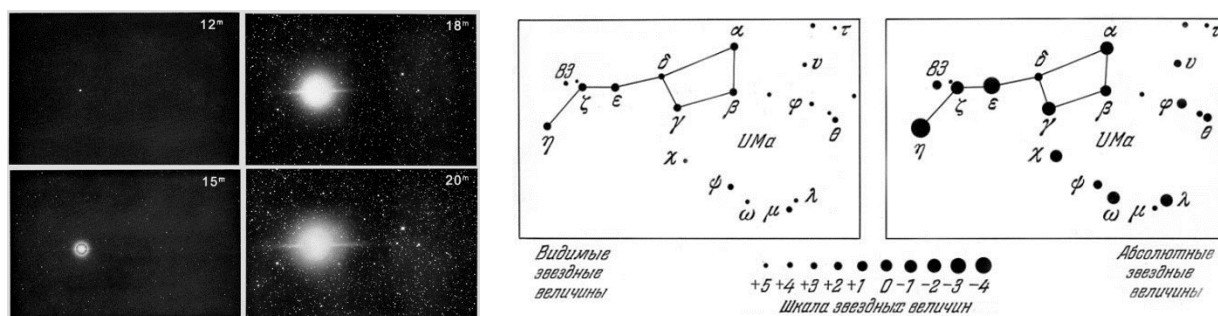


Рис. 6.6. а) участок неба в созвездии Возничий, полученный с разными экспозициями, б) видимые и абсолютные звёздные величины

А мы хотим узнать полную мощность излучения, то есть светимость. Для этого выражаем в абсолютных величинах. **Абсолютная звёздная величина ( $M$ )** – это видимая величина ( $m$ ) при наблюдении с расстояния  $r = 10$  пк при отсутствии межзвёздного поглощения света:

$$M = m + 5 - 5 \lg r \text{ (пк)}.$$

Расстояние 10 пк выбрали фиксированным в начале 20 века, когда вводили это понятие, потому что измерять расстояние методом параллакса с хорошей точностью дальше не умели.

От этого понятия надо уходить, поэтому что видимая звёздная величина – фактически **мощность излучения** звезды, абсолютную тоже можно измерять в Вт.

Видимая и абсолютная величины совпадают, если звезда находится от нас на расстоянии 10 пк и между нами и звездой нет среды. На расстояниях десятков парсеков среда вокруг Солнечной системы прозрачная, а дальше начинаются газопылевые облака, и в формулу добавляется **поправка на поглощение света**.

**Обзоры больших площадей неба** начались с появления **телескопа**, изображённого на рис. 6.7а. В нём первая большая камера системы Шмидта, фокальная плоскость (место размещения фотопластинки) у неё внутри, после зрения 6 на 6 градусов. Её поставили в Паломарской обсерватории в Калифорнии, и она впервые

перифотографировала всё доступное оттуда небо (3/4 небесной сферы) единым образом на фотопластинки. Впервые были получены обзоры слабых звёзд, туманностей, далёких галактик.



Рис. 6.7. (а) телескоп в Фламандской обсерватории, (б) более мощный телескоп, в) Large Synoptic Survey Telescope (Vera C. Rubin Observatory)

Потом появились **более мощные телескопы**, но они не могли перифотографировать всё небо и дать однородную картину для статистических исследований звёзд. На рис. 6.7б изображён пятиметровый телескоп с полем зрения 10 минут.

Но есть надежда, что в ближайшее время достроят телескоп **LSST (VRO)** (рис. 6.7в). Есть шанс, что техническое фотографирование начнётся уже в конце этого года, а к октябрю 2023 г. он уже выйдет на нормальный научный режим и начнёт обзоры неба.

У него очень сложная конструкция. Главное зеркало диаметром 8 м, с него свет идёт на вторичное, дальше на третье, которое вписано в центральную часть главного (поэтому эффективный диаметр главного 6,7 м), дальше на четвёртое, которое вписано во вторичное, потом на линзовую оптику с метровыми линзами для коррекции. Зато площадь, которую он фотографирует за один раз, аж 10 квадратных градусов, и на каждом снимке у него будет 3,2 млрд точек (пикселей). За 3–4 ночи он сможет перифотографировать всё небо до 24,5 секунд, а, накапливая свет, неоднократно фотографируя одни и те же участки неба, добраться до 27,5 величины. Придётся учиться обрабатывать огромные массивы данных.

То же самое сейчас в звёздной спектроскопии. В прошлом поколении наводили телескоп на одну звезду, даже если поле зрения большое, проваливали её в щель спектрографа, там длинная экспозиция в 1,5–2 часа. За ночь могли получить спектр одной звезды и за день его обработать.

Теперь появились **телескопы**, которые специально заточены на **спектроскопию**. Качество картинки у них не очень хорошее, потому что материалы недорогие, зеркало многосекционное из панелей, крутится только по азимуту, по высоте вращаться не умеет. Главное для них – собрать много света и направить на спектрограф. Одновременно получается 96 спектров, потому что в фокусе 96 щелей, и от каждой щели по оптоволокну идёт свой отдельный спектрограф.

Эту идею стали развивать, создали Слоановский цифровой обзор неба (SDSS) (рис. 6.8а). Телескоп 2,5-м на горе Апаچی-Пойнт в безлунные ночи снимал небо в 5 фильтрах со скоростью 20 кв градусов в час, а в лунные ночи получал спектры 640 объектов одновременно.



Рис. 6.8. а) Слоановский цифровой обзор неба, б) спектроскопический телескоп LAMOST, в) обсерватория Gaia

Спектроскопия здесь должна была проходить очень эффективно. В тех местах, где на небе были сфотографированы интересные галактики, на пластинке днём насверливались дырочки, в них вставлялось оптоволокно, и весь пучок (более 600 волокон) заводился в спектрограф. Эта пластинка на следующую ночь ставится в фокус телескопа, он наводится туда же на небо, и в каждую дырочку проваливается изображение интересного объекта. И за одну экспозицию спектрограф получает более 600 спектров одновременно. В 1996–2005 гг. была снята 1/4 неба и получены  $Z$  для 2 млн галактик.

Дальше в Китае сделали большой оптоволоконный спектроскопический телескоп LAMOST (рис. 6.8б). У него поле зрения размером 5 градусов. Свет попадает на четырёхметровое зеркало, потом в приёмник света, 4000 оптоволоконных световода передают изображения на 16 250-канальных спектрографов.

Классическая задача астрометрии – рассчитать **положение и скорость движения звёзд** на небе. Раньше это делали вручную, теперь это делает обсерватория Gaia (рис. 6.8в), она уже измерила положение и блеск более 1 млрд объектов с точностью от 20 микросекунд дуги до 200 микросекунд дуги, а это примерно 1/100 всех звезд в галактике. Спектроскопа там нет, но есть многоцветная фотометрия. Каждые 2–3 года мы получаем новые каталоги положения и движения звёзд с этого спутника.

**Измерение размеров** не особо прогрессирует. Новые методы появляются, но они не особенно эффективны. На сегодняшний день мы можем видеть только две **звезды** кроме Солнца как **протяжённые объекты**. Первая – Бетельгейзе, у неё большой размер (сверхгигант) и она близко к нам. Мы видим это даже с «Хаббла» прямой фотографией (рис. 6.9а). Белая часть – фотосфера, оранжевая вокруг неё – истечение, плотный звёздный ветер.

Наземный многообъективный интерферометр ближнего инфракрасного диапазона позволяют разрешить 5–7 элементов вдоль диаметра звезды (рис. 6.9б).

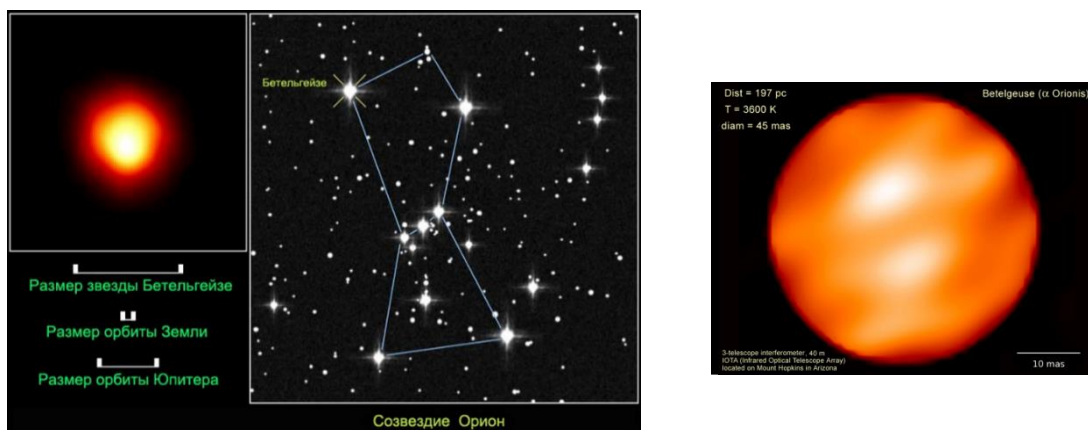


Рис. 6.9. (а) звезд Бетельгейзе, снимок Хаббла (б) снимок Бетельгейзе с наземного интерферометра

В других диапазонах мы видим более протяжённые области атмосферы Бетельгейзе – рис. 6.10а показывает её в инфракрасном диапазоне, а рис. 6.10б – в дальнем инфракрасном, когда холодная пыль улетела далеко от звезды, но продолжает быть плотной и наблюдаться.



Рис. 6.10. (а) Бетельгейзе в инфракрасном диапазоне, (б) пылевые оболочки Бетельгейзе в дальнем инфракрасном диапазоне

Интерферометрия – очень интересное направление астрономии, но слишком дорогое, а даёт штучные результаты. На рис. 6.11а самая дорогая **оптическая обсерватория** в мире – **VLT**: 4 восьмиметровых, 4 почти двухметровых телескопа, а результаты довольно скромные, потому что надо задействовать на целую ночь все телескопы для одной задачи.

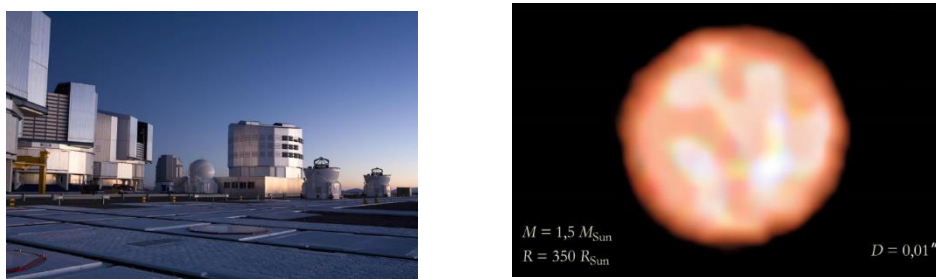


Рис. 6.11. (а) – оптическая обсерватория VLT, (б) – изображение красного гиганта  $\pi^1$  Журавля с интерферометра VLT



На рис. 6.11б видно, что качество картинка получается очень хорошее. Размер изображённой звезды –  $\pi^1$  журавля – всего 350 солнечных радиусов, видимый диаметр диска всего 0,01 секунды, а пятно минимального размера уложится вдоль диаметра диска аж 10 раз, то есть разрешение 0,001 угловой секунды. Это вторая звезда, которую удалось увидеть как протяжённый объект.

Строить на Земле более крупные оптические интерферометры, наверное, не удастся, потому что мешает атмосфера. Даже системе VLT приходится снабжать все телескопы системой адаптивной оптики, чтобы оптические свойства атмосферы не портили интерферометрическую картинку, иначе не сложатся когерентно лучи, которые каждый отдельный телескоп посылает в лабораторию под землёй. Их раздвинули примерно на 150 м, дальше уже даже адаптивная оптика не справится с выравниванием оптических путей. В космосе их можно было бы развести на километры, ещё на порядок улучшив угловое разрешение, но вряд ли когда-то найдутся деньги на такой проект.

Самые **горячие звёзды** мы видим как **голубые** (рис. 6.12а). Никакая поглощающая среда не может сделать звезду более голубой, чем она есть. Солнце в зените белое, а на заходе становится всё краснее (рис. 6.12б), когда уходит в ту область, где мы видим его через большую толщу воздуха. Поглощаются прежде всего голубые лучи, а до нас доходит красный свет, который не поглощается.



Рис. 6.12. (а) фотография звёзд разной температуры, (б) Солнце на закате, в) спектры звёзд, полученные через объективную призму

А вот про звезду, которая **видна как красная**, сказать, такая ли она на самом деле или нет, без дополнительных исследований невозможно. Она тоже может быть голубая, но между ней и нами плотная пылевая атмосфера.

Тогда приходится получать **спектры**, которые по наличию и отсутствию некоторых линий однозначно говорят о температуре в фотосфере звезды, то есть об истинном цвете объекта.

Раньше были попытки **массовой спектральной классификации звёзд**, и они были относительно успешными. На телескоп вешали сверху большой стеклянный клин, который играл роль призмы, и он уже на входе в телескоп расщеплял свет на составляющие (рис. 6.12в). В телескопе максутовская камера. На каждой фотографии каждая звезда вытягивалась в маленький спектр.

В них было очень сложно замечать различия. За всю историю советской астрономии с этим материалом работало всего два человека.

Тогда на одной фотопластинке за одну экспозицию можно было получать десятки спектров, а сегодня мы получаем тысячи.

**Измерение собственного движения ближайших звёзд** – астрометрическая работа, она очень сильно продвинулась после того, как стали измерять в космосе положение звёзд и его изменение со временем. На рис. представлены самые быстро перемещающиеся звёзды на фоне диаметра лунного диска. Собственное движение (рис. 6.13а) – это угловое смещение объекта на фоне таких далёких объектов, про которые мы можем сказать, что они почти никогда не сместятся – квазаров, далёких галактик и просто звёзд нашей Галактики, но очень слабого блеска, а значит, находящиеся от нас очень далеко.

Звезда Барнарда третья от нас по расстоянию после системы  $\alpha$  Кентавра, почти также быстро движется Звезда Каптейна.

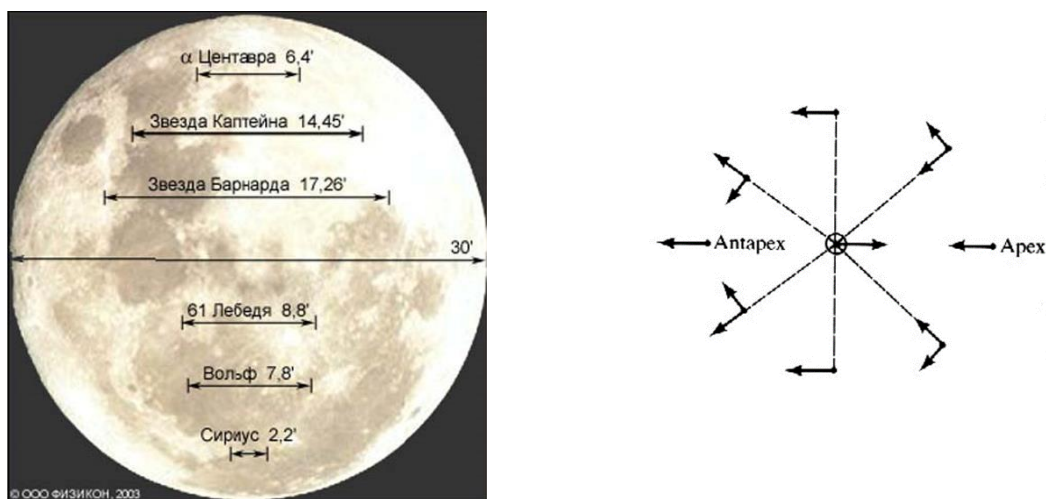


Рис. 6.13. а) собственное движение ближайших звёзд (за 100 лет)

Э. Барнард первым в истории научился делать фотографии с потрясающими свойствами и создал **атлас Млечного пути**. Его экспозиция продолжалась до нескольких ночей. Дневное время фотопластинка проводила в закрытом состоянии, а ночью телескоп опять наводили на то же место.

Собственное движение звёзд слабое, но, точно измерив его один раз, можно **интерполировать** назад и вперёд во времени. Например, ковш Большой Медведицы раньше имел другую форму и в будущем тоже её изменит, потому что средние звёзды имеют почти одинаковое собственное движение, а крайние оказались на данной площади случайно, они летят в другом направлении. Уже после измерения собственного движения звёзд  $\zeta, \epsilon, \delta, \gamma, \beta$  начали измерять их химический состав, возраст и поняли, что эти звёзды родственные.

Не только движение других звёзд, но и **движение Солнечной системы** можно понять, измеряя движение других звёзд (рис. 6.13б). Как бы объекты хаотически ни перемещались, наша собственная скорость (направление апекса) приводит к тому, что передние движутся в направлении к нам, задние от нас, а боковые перпендикулярно лучу зрения. Массовое измерение положений звёзд свидетельствует о том, как само Солнце движется по отношению к ближайшим звёздам. Сейчас мы летим в направлении созвездия Геркулес со скоростью примерно 30 км/с.

### Двойные звёзды

Мы бы ничего не знали о массах двойных звёзд, если бы не пользовались законом Ньютона и не измеряли их орбиты. Двойные звёзды **классифицируются** у астрономов по разным группам. Например, **визуальная двойная** – когда их одновременно можно увидеть в телескоп раздельно. Дальше надо понять, мы случайно видим в одном направлении два объекта, или это реально система, где они близко живут и тесно связаны гравитацией. Если случайно, то это **оптическая (мнимая) двойная**. А бывают **физические двойные**.

Среди физических звёзд могут быть **визуальные**, когда мы достаточно чётко их различаем: например, на рис. 6.14а между такими звёздами 35 секунд. Но бывают и **неразличимые**.

Раз Земля движется по орбите, значит, у звёзд должны быть **годовые параллаксы**. У Гершель придумал новый способ их **измерить**. От предложил найти пары звёзд, и, если одна из них ярче, а другая слабее, значит, одна ближе, а другая дальше. Дальше надо измерять положение яркой звезды относительно слабой, тогда слабая как более далёкая не будет смещаться по углу, а близкая покажет заметный параллакс.

Он заметил **взаимное движение звёзд** в некоторых парах, но довольно быстро понял, что это не параллакс, потому что не было годичной периодичности, а просто физически связанные двойные звёзды. Он впервые открыл **физическую настоящую двойственность звёзд**.

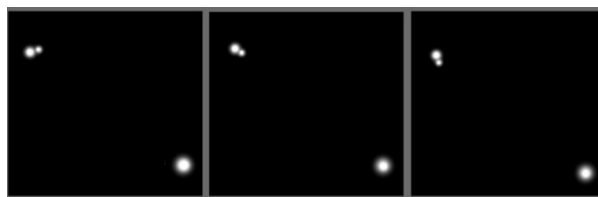


Рис. 6.14. а) визуальная двойная Альбирео ( $\beta$  Cyg), б) перемещение двух компонент Kruger 60 (D0 Cep)

На рис. 6.14б видно, как за 12 лет два компонента одной системы перемещаются друг относительно друга. На фотографии оставлена случайно попавшая в поле зрения звезда, чтобы было понятно, что ориентация не менялась. Видно, что компоненты

повернулись примерно на 90 градусов, значит, орбитальный период у этой системы примерно 50 лет.

Когда такой маленький период, а звёзды разделяются, это большая редкость. В Солнечной системе у Сатурна период 30 лет, значит, расстояние между этими звёздами порядка 10 а. е., а мы их видим раздельно. Из этого можно сделать вывод, что эта система очень близко к нам.

Для двойных звёзд можно измерить два параметра – **угловое расстояние** и **ориентацию**, взяв за опору звезду поля (рис. 6.15а), иначе мы ничего не узнаем об их массах. Угловое расстояние для них называется **разделение**, а ориентация задаётся **позиционным углом**, как правило, относительно направления на север относительно плоскости меридиана.

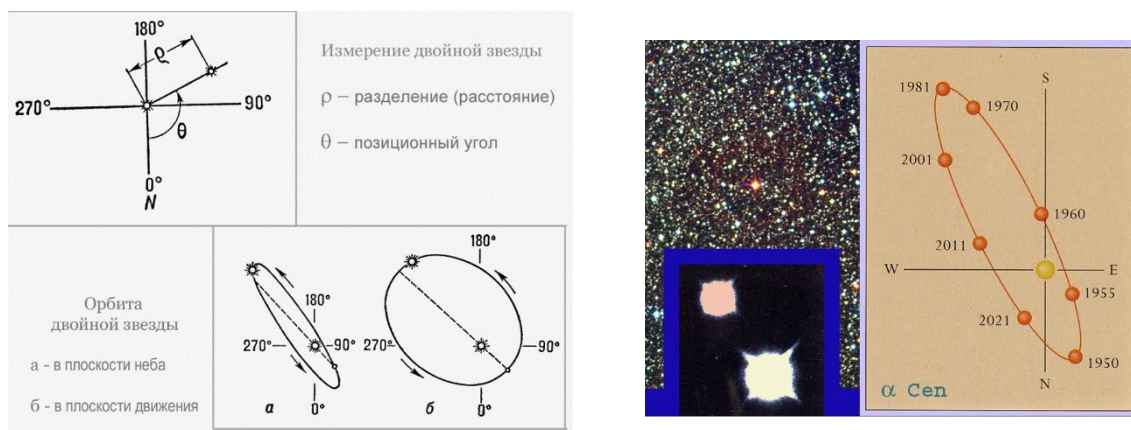


Рис. 6.15. а) разделение и позиционный угол двойных звёзд, б) орбита двойной звезды  $\alpha$  Кентавра

Обычно в паре визуально двойных звёзд первый (**главный**) компонент более яркий, он считается неподвижным, относительно него измеряют положение угол и угловое разделение **вторичного компонента**. Если проверить всю орбиту, получится эллиптическая фигура (нижнее изображение на рис. 6.15б), но понятно, что это не орбитальный эллипс, потому что мы видим орбитальную плоскость в какой-то проекции, она под каким-то углом к лучу зрения, и её надо развернуть в орбитальную плоскость, чтобы увидеть реальную орбиту. Это делается математическими методами, и дальше можно измерять орбитальные параметры.

Легче всего измерить это у близких систем. На рис. 6.15б изученная лучше всего двойная звезда  $\alpha$  Кентавра. Разница в массе звёзд примерно на 50%, но мы всегда изображаем главный компонент в центре координат, и относительно него движется второй менее яркий компонент.

Не каждую эпоху удаётся удаётся их детально измерить. В 90-е гг. стали работать большие телескопы, спектроскопия стала детальной, и было большое разделение: можно было по отдельности снимать спектр каждой звезды, а в ближайшие годы они будут так

близко друг к другу, что только на космических снимках их смогут разделить и детально изучать. Потом разделение вновь станет большим.

1 радиан = 206265". **Одна угловая секунда** будет, если мы посмотрим на объект диаметром 2 см с расстояния 4 км (рис. 6.16). А те, кто занимаются двойными звёздами, без труда различают десятую долю угловой секунды.



Рис. 6.16. Угловая секунда

Если изучаем двойную систему, и два компонента так близко, что не различить, иногда оказывается, что **второй компонент** демонстрирует странные **колебания** (рис. 6.17). Измерения были относительно яркой звезды, значит, эта звезда тоже испытывает движение относительно центра масс, то есть рядом с ней есть что-то слабо светящееся.

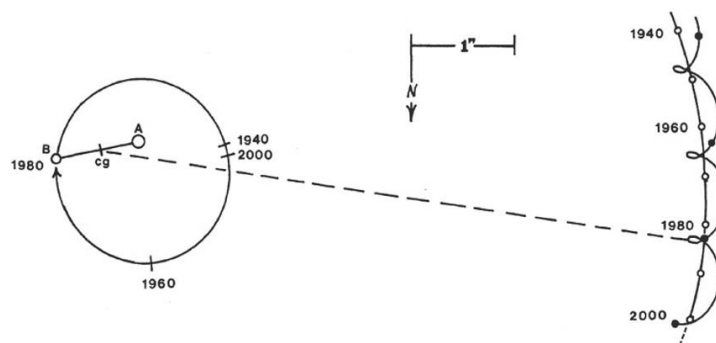


Рис. 6.17. Колебания второго компонента двойной звезды

**Как далеко** могут быть **двойные звёзды**, на изучение которых хватит времени работы одного астронома, то есть для которых он сможет проследить хотя бы один орбитальный период? В среднем время профессиональной работы астронома 30 лет. Берём 3-й закон Кеплера в форме Ньютона:

$$p = 2\pi \left( \frac{a^3}{GM_{tot}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

пусть  $M_{tot} = 2M_{\text{Солнца}}$ , тогда орбита будет  $a = 12$  а.е. Если угловое разрешение  $1''$ , такое расстояние видно под таким углом с дистанции 12 пк. То есть реально изучать визуальные двойные звёзды можно только на очень малых расстояниях от Солнца.

Даже если наблюдать не одно поколение, например, 300 лет, расстояние будет только 12 пк.

**Другие методы для изучения двойных звёзд** на больших расстояниях есть, но, чтобы ими пользоваться, нужна редкая ситуация. Например, **взаимное затмение звёзд**. Если орбитальная плоскость системы оказывается направлена на нас (рис. 6.18а), мы замечаем регулярные изменения яркости и можем определить **орбитальный период**

двойной системы по длительности затмения (первая звезда закрывает вторую, потом наоборот) можем сказать что-то об их размерах. Также можем приблизительно оценить **температуру** их поверхности: одно затмение небольшое, второе глубокое, значит, сначала тёмная звезда прошла перед яркой, потом яркая перед тёмной.

Хорошо, если **расстояние** измерено, хотя его можно косвенно измерять, даже не имея параллакса. Например, по видимой яркости и температуре, которая даёт спектр. Размер звезды мы тоже знаем, вычисляем **светимость**, а зная светимость и блеск, определяем расстояние.

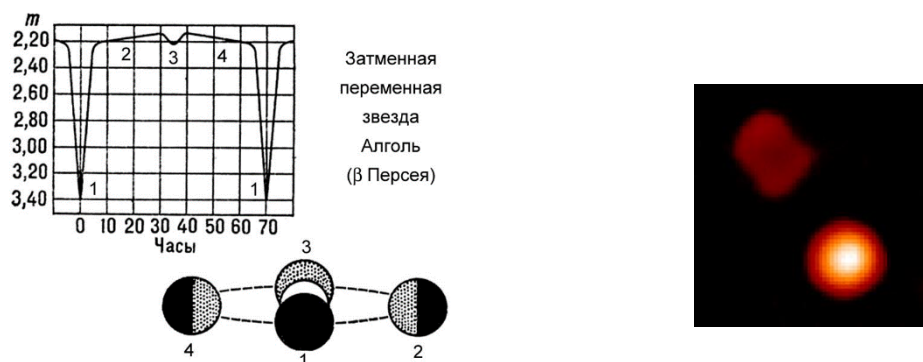


Рис. 6.18. а) изменения яркости двойной системы  $\beta$  Персея Алголь, б) разрешение двух компонент звезды Алголь

На рис. 6.18а представлена самая известная звезда такого типа, первая обнаруженная –  $\beta$  Персея Алголь. Поначалу мы относили все такие системы к затменным переменным. Переменность блеска свидетельствует о взаимном затмении двух компонент, никакой надежды увидеть их по отдельности не было, но зато по форме кривой блеска можно было определить относительную яркость поверхности (ведь звёзды при разных вариантах затмения закрывают друг у друга одинаковую площадь поверхности), а отсюда температуру.

На графике видно, что после окончания **главного затмения** начинается рост яркости, потом **вторичное затмение**, потом яркость падает, дальше опять главное затмение. Падение и рост яркости объясняется тем, что в центре более яркая звезда, её свет падает на более холодную. Это называется «**эффект отражения**», хотя по факту скорее эффект прогрева: горячая звезда нагревает одно полушарие другой звезды до более высокой температуры, оно светится ярче, поэтому после первичного (главного) затмения к нам начинает поворачиваться это яркое полушарие вторичного компонента. Потом происходит вторичное затмение, а дальше уменьшение фазы этого полушария.

Когда появились интерферометры с хорошим разрешением, такие системы, тот же Алголь, стали разрешать по углу. На рис. 6.18б мы видим по отдельности **горячий и холодный компонент**.

Иногда удаётся шаг за шагом выявлять всё более сложную структуру у таких двойных звёзд. Нам известны **Алькор и Мицар**, но, если посмотреть в небольшой телескоп, можно и Мицар разрешить на 2 компонента – Мицар А и Мицар В (рис. 6.19а).

Но когда наводим спектроскоп на более яркий компонент Мицар А, видим, что с периодом двое суток линии то разделяются, то сливаются вместе, и понимаем, что это на самом деле двойная система, причём, т. к. мощность (глубина) линий практически одинаковая, система состоит из почти одинаковых звёзд. То есть это четырёхкратная звезда.

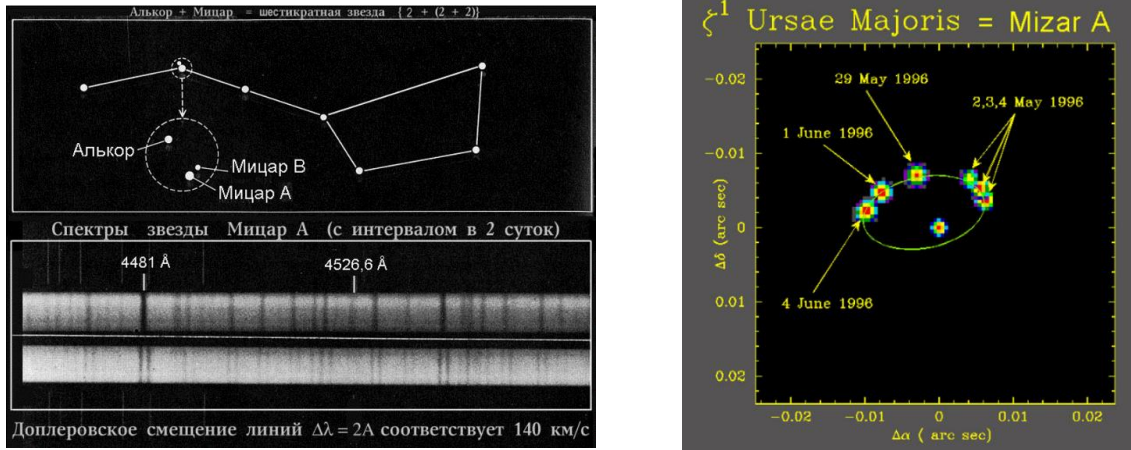


Рис. 6.19. (а) Алькор и Мицар, 4 компоненты, (б) – пять компонент системы Алькор и Мицар

Потом на Мицар навели интерферометрический комплекс инфракрасного диапазона. До этого считали систему Мицар А спектральной двойной, то есть разрешить не могли, но вид спектра говорил, что там два компонента. А теперь она стала визуальной двойной (рис. 6.19б).

Но когда использовали адаптивную оптику на 5-м Паломарском телескопе и звёздный коронограф, который прикрывал яркий компонент, видимый глазом (Алькор А), оказалось, что рядом с ним есть маленький Алькор В (рис. 6.20а). То есть на самом деле это пятикратная система.

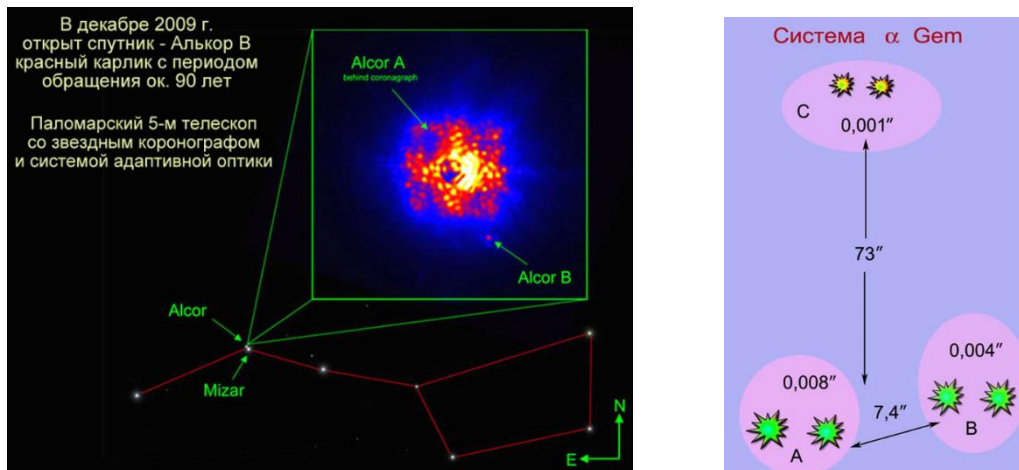


Рис. 6.20. (а) Алькор А и В, (б) шестикратная звёздная система

Пять звёзд в одной системе встречается очень редко. Самые сложные многократные системы мы видим только **с шестью звёздами: Кастор** и ещё несколько подобных (рис. 6.20б). Доказано, что там все компоненты надёжно связаны гравитацией и имеют **иерархическую структуру**. Шесть звёзд делятся на три группы по две, две группы близко друг другу, но взаимное расстояние между звёздами в парах сотые доли секунды, а физически они друг от друга на расстоянии нескольких секунд. А третья двойная система, где звёзды также близко (или даже ближе), ещё на порядок дальше, чем предыдущие две группы.

Только такая конфигурация может довольно долго оставаться пусть не совсем в стабильном, но хотя бы в связанном состоянии. Звёзды в парах чувствуют только друг друга, всё остальное от них далеко. Каждая из ближних пар чувствует другую как одиночную звезду, потому что они там слишком близко. А третья пара чувствует как одиночную звезду всю четвёрку, потому что находится от неё очень далеко. Тогда мы имеем почти идеальное **Кеплерово движение**: каждая пара движется практически по эллиптическим орбитам.

Однако когда-нибудь они всё-таки распадутся. Достаточно одной из звёзд, особенно наиболее массивной из них, проэволюционировать (сбросить оболочку или взорваться как сверхновая), тут же улетит другая звезда из пары, и остальное тоже распадётся.

Пока достоверно не известно, есть ли в природе **более сложные системы**. Более половины всех звёзд живут в виде двойных систем. Такие системы не распадаются, пока существуют сами звёзды. А вот кратные звёзды очень сложно выявлять. Например, если у этой шестёрки есть седьмой компонент, он должен быть хотя бы на порядок дальше, чем 73 секунды. При таком большом расстоянии скорость маленькая, и его орбитальное движение будет заметным, только если мы будем наблюдать за ним тысячелетия. К тому же ещё действуют приливные силы со стороны Галактики, которые могут его оторвать, и тогда будет нельзя сказать, связан он гравитационно или нет.

Самый надёжный **каталог кратных** (более сложных, чем двойные) **звёзд** был создан А. Токовининым. Там есть семи и даже восьмикратные системы, но пока только предполагаемые. Точно можно будет утверждать только через ещё несколько столетий наблюдений.

Двойные звёзды позволяют нам изучать каждый компонент индивидуально. Мы мерим лучевые скорости звёзд. Большая волна на графике на рис. 6.21 – **орбитальное движение**. Но иногда на этой волне наблюдаются два горбика – один с плюсом, другой с минусом. Это момент **затмения**, когда более тёмный компонент закрывает более яркий. Сама звезда вращается, в первый момент мы видим удаление её от нас (положительная лучевая скорость), а во второй момент к нам приближается другое полушарие (отрицательная угловая скорость, которая накладывается на орбитальное движение).



Значит, мы измерили **скорость вращения звезды**. Просто так измерить её по ширине спектральных линий трудно, особенно если она маленькая, а в момент затмения роль заслонки играет второй компонент.

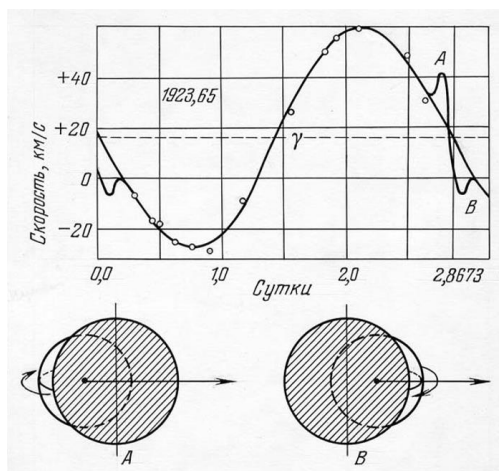


Рис. 6.21. Орбитальное движение и вращение звёзды

Вспомним, как с помощью измерения положения звезды на небе впервые удалось выявить **присутствие невидимых компонент**. Ф. Бессель наблюдал положение **Сириуса**, заметил, что его собственное движение волнообразное, и предсказал существование второго компонента рядом с ним (рис. 6.22). Потом А. Кларк увидел вторую звезду в телескоп. А в нашу эпоху получили рентгеновское изображение этой двойной системы, и оно показало, что маленькая звезда активнее проявляется именно в этом диапазоне, а значит, намного горячее, чем основная звезда. Температура звезды Сириус А 9940 К, а Сириус В – 25200 К. С этого начало открытие нового класса объектов – **белых карликов**.

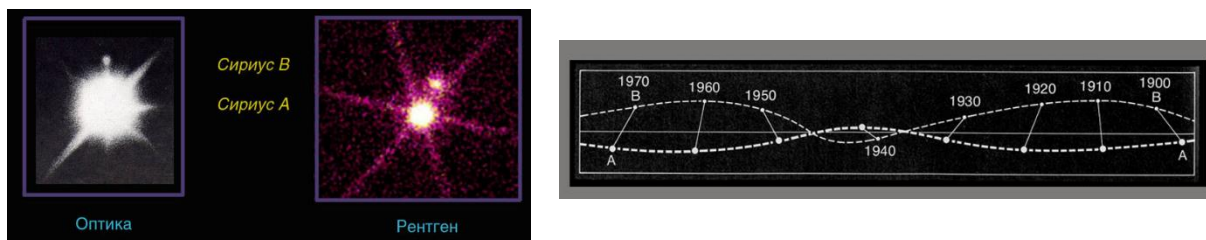


Рис. 6.22. Присутствие Сириуса В около Сириуса А

В ближайшие годы между компонентами будет максимальное разделение, и их можно изучать по отдельности.

Аналогично открыли **коричневые карлики**. Когда в середине 90-х гг. их поиск стал актуальным, надо было как-то понять, что перед нами. На рис. 6.23а показан слабо светящийся объект, но он может быть далеко, а может близко, расстояние до него измерить практически невозможно. Но если он рядом со слабо светящейся звездой, а на рисунке она закрыта экраном, то почти очевидно, что это двойная система. Большая звезда обычно хорошо изучена, а до маленькой звезды такое же расстояние. Это

позволило измерить блеск и светимость таких объектов – миллионные доли от солнечной.



Рис. 6.23. а) коричневый карлик Gliese 22В, б) Йеркский рефрактор, в) рефрактор в горной обсерватории

Таким образом было доказано существование коричневых карликов. Это не звёзды, а промежуточные объекты между звёздами и планетами-гигантами.

С помощью **длинных рефракторов** (большое фокусное расстояние) двойные звёзды стали измерять ещё в конце 19 века. Очень важно продолжать эти измерения, не меняя инструмент. Все ошибки, которые он вносил в изображение, сохраняются.

На рис. 6.23б показано, как выглядит крупнейший в мире (40 дюймов) **Йеркский рефрактор**. Условия для его работы там плохие: он находится почти на уровне моря, тем не менее, двойные звёзды на таких инструментах веками плодотворно исследуют.

Есть ещё совсем **необъективные методы изучения двойственности звёзд**. Например, мы не видим вообще никаких признаков, но звезда регулярно немного меняет свои параметры. На красных карликах часто бывают **вспышки**, на звёздах типа Солнца реже, но тоже случаются. И у этих проявлений есть **периодичность** – например, у солнечной активности период 11 лет (рис. 6.24). А у главного возмутителя Солнца – Юпитера – орбитальный период довольно близкий к периодическому изменению солнечной активности. И всё ещё существует гипотеза, что именно Юпитер влияет на активность Солнца. Уверенность в этом уменьшается, но мы наблюдаем многие звёзды, уже выявили их периоды активности (в основном у красных карликов), и, может быть, это говорит о том, что рядом есть массивный компонент, который влияет на поведение главной звезды. Но это ещё надо исследовать.

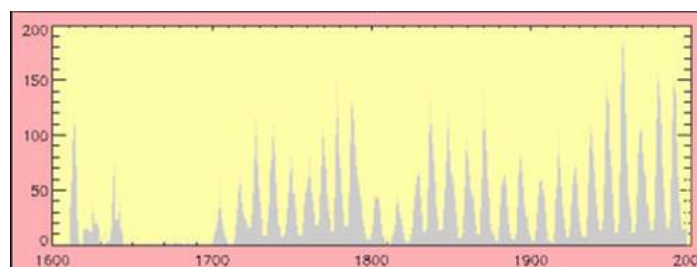


Рис. 6.24. Солнечная активность с 1600 по 2000 гг.

В период окончания эволюции звезды её двойственность тоже проявляется, например, в форме **планетарной туманности**. На рис. 6.25а видно, что звезда была шаром и сбросила шарообразную оболочку.



Рис. 6.25. (а) – стандартная планетарная туманность, (б) – планетарная туманность с зеркальной симметрией, (в) – одна из компонент двойной системы сбрасывает оболочку

А вот когда мы видим планетарные туманности как на рис. 6.25б, надо думать, почему у неё **зеркальная симметрия**, есть плоскость, относительно которой газ разлетается, а в другой лететь не хочет. Почти очевидно, что в вертикальной плоскости ему что-то мешает, что это плоскость движения каких-то объектов вокруг звезды-прародительницы протопланетарной туманности. Но что там – то ли планетная система, до ли двойная звёздная, удаётся понять не всегда. Тем не менее, это указание на то, что звезда не одиночная.

Также бывают эффекты как на рис. 6.25в. Звезда странно сбрасывала с себя оболочку, её исследовали, и оказалось, что она двойная. На этапе расширения оболочки звезды-гиганта она накрыла **второй компонент**, и тот стал её срезать и разбрасывать на большие расстояния.

## Лекция 7. Природа и эволюция звёзд

### Спектры звёзд

Спектры звёзд мы получаем, живя на Земле. Иногда бывают космические телескопы, но в основном они наземные, поэтому мы будем говорить ещё и про то, как свет преодолевает атмосферу.

**Спектры** – это пространственное разделение белого света на составляющие. На рис. 7.1а представлена простейшая схема **спектрографа**. Коллиматор нужен, чтобы на все части плоской грани призмы лучи проходили параллельно, иначе они будут по-разному преломляться. Щель необходима для того, чтобы отсечь фон неба: рядом с исследуемой звездой могут быть другие, которые дают свой рассеянный свет, но даже если их нет, небо яркое. Щель представляет из себя не круг, а длинную полоску, и мы водим телескопом вдоль неё, чтобы на спектре получились линии, а не точки. На линию удобнее наводить измерительную линию в микроскопе, её удобнее измерять компьютерной программой.

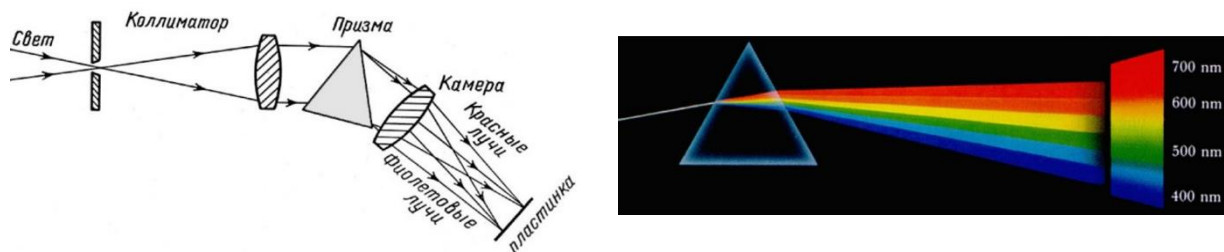


Рис. 7.1. а) схема спектрографа, б) получение спектров

**Спектры элементарных химических элементов** похожи друг на друга (рис. 7.2). Самые простые у одноэлектронных элементов (водорода, гелия), а у некоторых довольно сложные.

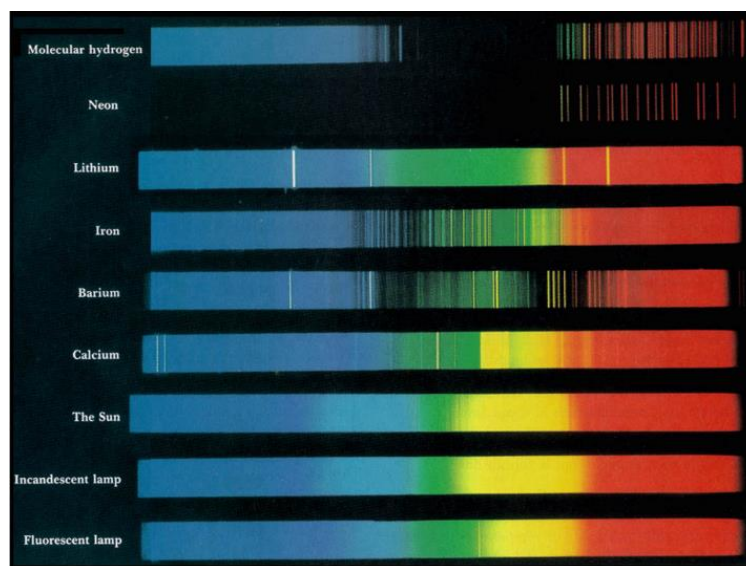


Рис. 7.2. Спектры разных элементов и источников

Первым человеком, который начал получать спектры звёзд, был любитель астрономии У. Хёггинс. На рис. 7.3 показано, как выглядит **оптический спектр** типичной **солнцеподобной звезды**. Он довольно грубый, в нём видны только основные линии.

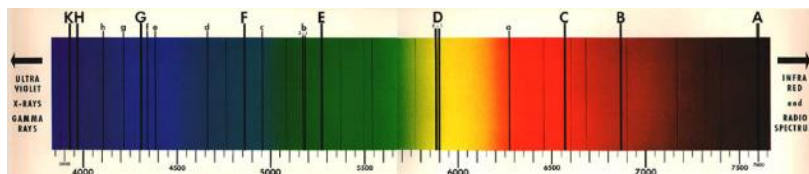


Рис. 7.3. Оптический спектр Солнца или солнцеподобных звёзд

Каждое место на спектре – изображение щели, растянутое по длинам волн. Иногда щель выкидывают, и тут получаются только цветные изображения самого объекта. Это не очень удобно, потому что они будут накладываться друг на друга и перемешаются.

Линии спектра называются **фраунгоферовыми**, потому что Й. Фраунгофер первым стал их рассматривать в спектроскоп и обозначил буквами латинского алфавита. На рисунке видно D дублет натрия, жёлтая линия.

Можно не обращать внимание на эти тонкие линии, а просто посмотреть, как вдоль спектра распределена энергия излучения. Максимум яркости где-то в жёлтом диапазоне, а к голубому и к красному концам яркость спектра падает.

Если мы профотометрируем (промерим, сколько света приходит на каждый элемент спектра), при источнике, близком к абсолютно **чёрному телу**, получим **одногогорбую кривую** (рис. 7.4а). Абсолютно чёрное тело всё поглощает, поэтому излучает во всех диапазонах. Это практически любой объект, где много свободных электронов, которые при нагревании будут, беспорядочно двигаясь, излучать на всех длинах волн. Тогда спектр описывается кривой Планка.

**Нагревая тело** до разной температуры, заметим, что горб сохраняется, но его положение всё время меняется и мощность излучения с каждого участка площади нагретого тела всё время увеличивается.

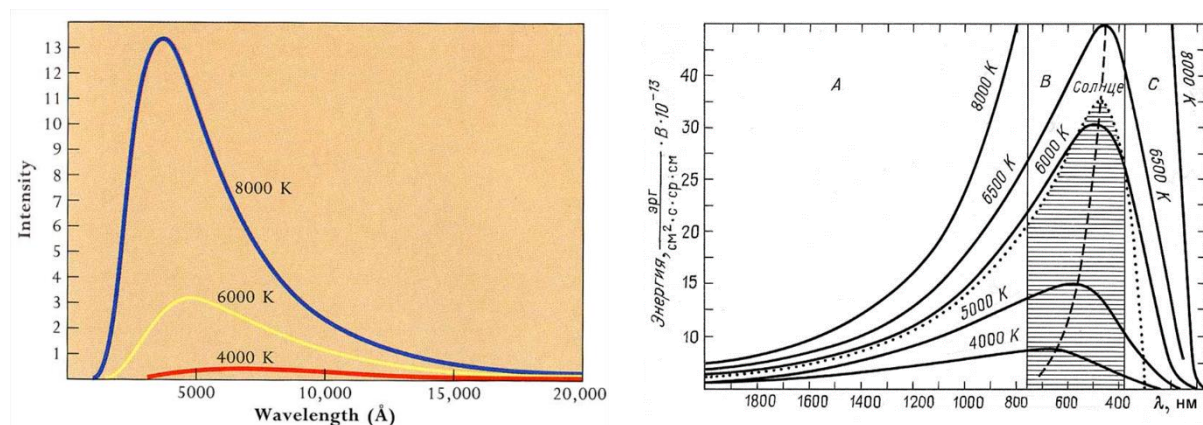


Рис. 7.4. а) распределение энергии излучения вдоль спектра абсолютно чёрного тела, б) спектр Солнца, на котором выделен диапазон, пропускаемый атмосферой

От Солнца мы получаем широкий спектр, но атмосфера пропускает довольно узкий диапазон. Но, к счастью, именно тот, в котором Солнце, имеющее температуру 6000 К, имеет максимум (рис. 7.4б).

То есть прозрачность нашей атмосферы настроена на излучение Солнца. Если бы максимум Солнца лежал в другой области спектра (в голубой или красной), до нас доходила бы небольшая доля излучения. Надо отметить, что эволюция сделала наши глаза чувствительными к максимальному потоку солнечного света.

Если измерять яркость какой-нибудь звезды в двух не очень широких диапазонах спектра, то можно по относительной яркости звезды в этих диапазонах (например, в жёлтых и в красных лучах или в жёлтых и голубых) судить в первом приближении о температуре поверхности (рис. 7.5а).

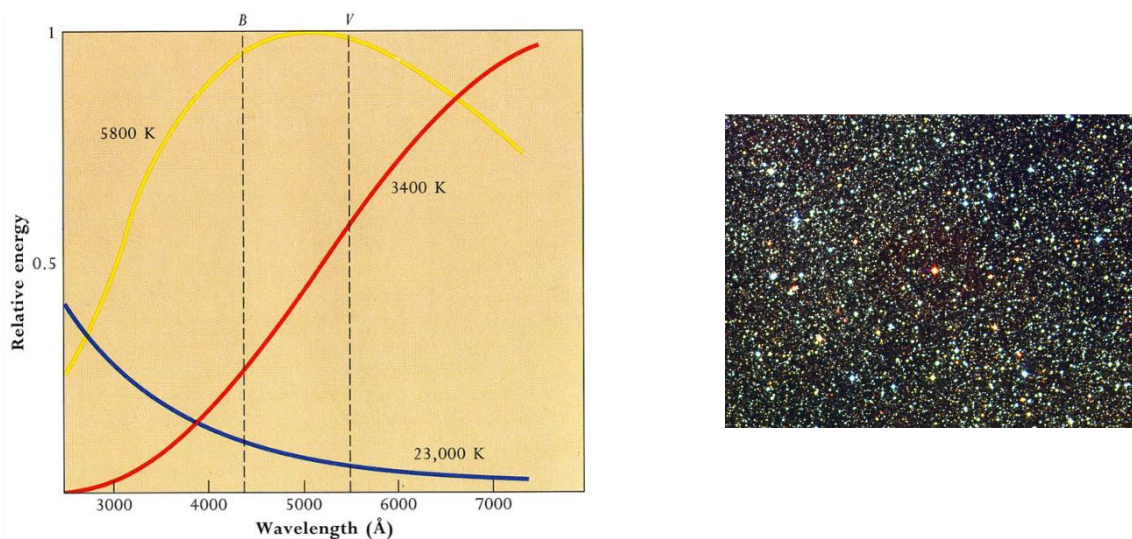


Рис. 7.5. а) связь температуры и яркости звезды, сфотографированной через светофильтры, б) звёзды разного цвета

Представим, что мы сфотографировали одну и ту же звезду через два светофильтра. Если она в голубых лучах ярче, чем в оранжевых, значит, у неё температура высокая, если слабее, то низкая, а если изображения имеют примерно одинаковую яркость, то её температура в районе 6000 К.

Это называется широкополосной фотометрией. В основном массовое изучение звёзд именно так и делается, потому что получить детальный спектр очень трудно. Только сейчас появляются приборы, которые могут, например, за раз измерить 4000 спектров, и таких телескопов мало.

Но не всегда свет гарантирует точную информацию о температуре поверхности. Если объект голубой, то он точно горячий, но, если он красный, это вовсе не значит, что он холодный (рис. 7.5б). Возможно, между нами и звездой полупрозрачная среда, которая поглотила голубые лучи. У голубого света больше энергия фотонов, он легче застревает, т. к. легче ионизует, возбуждает, рассеивается на частицах. А красный –

длинноволновый, его дифракция происходит на пылинках, мимо частиц он проходит, не поглощаясь. Поэтому красная звезда может иметь любую температуру.

**Вид спектра** зависит от того, что излучает. На рис. 7.6а представлен очень **рассеянный (малоплотный) горячий газ**. Если газ рассеянный, то атомы далеко друг от друга. Мы нагреваем газ, атомы возбуждаются за счёт редких столкновений друг с другом. Один атом сталкивается с другим, возбуждается, электрон перепрыгивает на более высокий энергетический уровень, и дальше этот атом летает, ждёт, пока электрон вернётся на основной уровень, и ему ничего не мешает. Если газ состоит из одинаковых атомов, все они излучают на одних частотах, и в спектре на тёмном фоне получаются те длины волн, на которых атомы этого газа могут естественно излучать.

Эти **линии** очень **тонкие**. Если забыть про ширину щели, то ширина спектральной линии определяется естественной шириной линии, связанной с тем, что излучение длится короткое, но определённое время. Колебание начинается, прекращается, и цуг электромагнитной волны летит к нам. Его невозможно описать строго периодической функцией, потому что у него есть начало и конец. Даже синусоидальную функцию, обрезанную на концах, можно представить только как набор синусоид, которые, складываясь вместе, дают это обрезание.

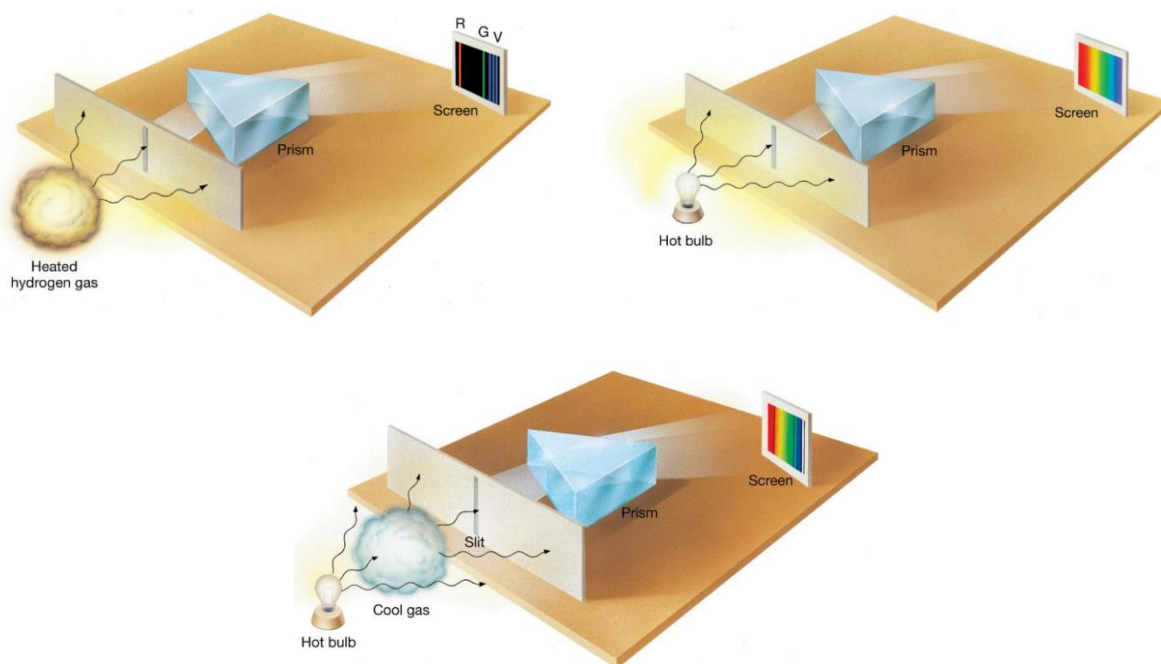


Рис. 7.6. (а) спектр рассеянного малоплотного газа, (б) спектр лампы накаливания, (в) спектр излучения непрерывного источника, прошедшего через разреженный газ

По ширине спектральных линий узнаются все свойства излучающего тела: о его движении (доплеровское смещение), о его скорости вращения, плотности газа (чем плотнее газ, тем сильнее мешают друг другу соседние атомы, поэтому они немного по-другому излучают).

Рассмотрим другой вариант: ставим плотное тело с большим количеством свободных электронов (например, проводник электричества, железо), нагреваем его (рис. 7.6б). Если взять **лампу накаливания**, её нагревает электрический ток, электроны хаотически движутся и излучают в широком диапазоне длин волн. Тогда мы получаем засветку спектра целиком, на любой длине волны мы что-то от горячей спирали получим. Это **непрерывный спектр**: нет промежутков, мест высокой и низкой яркости.

Наконец, **совмещаем** эти два варианта. Излучение источника непрерывного спектра проходит через разреженный газ и дальше идёт в спектроскоп (рис. 7.6в). Тогда мы получим **непрерывный спектр**, но на его фоне будут небольшие **тёмные линии**, потому что при проходе через газ некоторые кванты с энергией, характерной для атомов этого газа, им поглощаются. Конечно, атом, поглотивший квант, через некоторое время его излучит, но раньше квант летел к щели, а теперь может быть излучён в любом направлении.

На рис. 7.7а представлены **два варианта спектра**, для примера выделен дублет натрия. Мы взяли облако паров натрия и за ним поставили источник непрерывного спектра (горячее тело). Получился непрерывный спектр с двумя тёмными линиями. Они не абсолютно чёрные, пары натрия что-то через себя пропускают. Соответственно, на верхнем спектре эмиссионные линии – линии излучения, на нижнем – линии поглощения. Они показывают, какой газ перед нами.

**Спектр Солнца** очень сложный. На рис. 7.7б показано, как его впервые зарисовал Й. Фраунгофер.

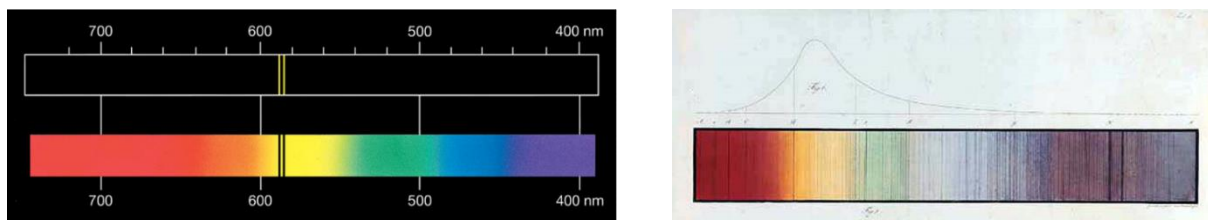


Рис. 7.7. (а) – линии излучения и поглощения натрия, (б) – первый рисунок спектра Солнца

Теперь рассмотрим **звезду** (рис. 7.8а). Нижние горячие слои звезды – это фоновый источник излучения, он очень яркий и даёт непрерывный спектр. В центре звезды происходят термоядерные реакции, дальше кванты света медленно диффундируют, рассеиваются, поглощаются. Верхняя часть звезды очень непрозрачная, квантам сложно пробиться, и они просто нагревают подошву этого слоя, и он начинает кипеть. Горячее вещество всплывает, холодное опускается и снова нагревается, то есть это конвективная зона. На Солнце она занимает примерно верхнюю треть звезды.

И вдруг появляется место, с которого кванты могут пробиться и уйти в космос. Очевидно, что оно самое холодное, потому что там поверхность звезды остывает легче всего. Раз там холодное, а внутри горячее, мы получаем **спектр поглощения**. Фон горячий, перед ним холодное тело.



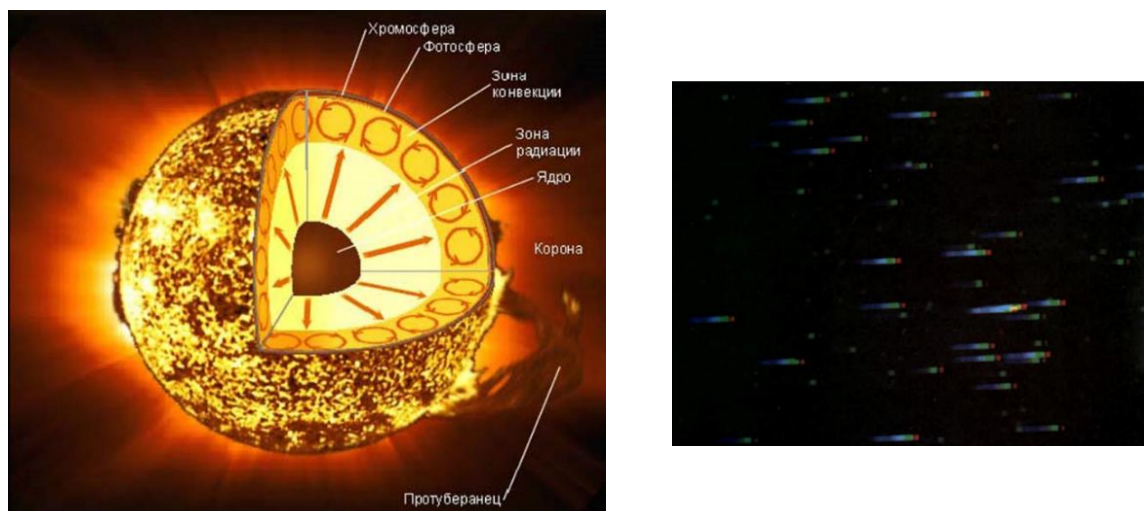


Рис. 7.8. (а) строение звезды и процессы теплопередачи в ней, (б) снимок звёзд через объективную призму

На рис. 7.8б показан снимок, сделанный через объективную призму. Каждая звезда превратилась в маленький спектр. Там нельзя найти ярких линий. Темные линии – Н и Са (ионизованный кальций), они характерны для звёзд с температурой 5,5–6 тыс. кельвинов. Здесь видны только линии поглощения, а линий излучения не видно, потому что в основном это горячий фон и последний холодный слой звезды – её фотосфера.

Некоторые звёзды обладают способностью демонстрировать и **линии излучения**, но для этого звезда должна быть окружена горячим полупрозрачным газом, который на фоне непрерывного спектра добавляет излучение в отдельных линиях. То есть это возможно для звёзд с протяжёнными и довольно плотными коронами, откуда истекает газ.

Для астрономов самое необходимое – разобраться в **атоме водорода**. Вся природа и все звёзды состоят из водорода. Это самый простой атом. На рис. 7.9а показано, что в центре один протон, а дальше условно нарисованы **уровни возбуждения электронной оболочки**, состоящей из одного электрона.

Заметим, что в некоторых учебниках самый нижний уровень, на котором электрон находится в холодном газе, обозначают как  $n = 0$ , а в некоторых как  $n = 1$ .

Разрыв энергии между основным и первым возбуждённым уровнем очень большой, дальше разрывы всё меньше, а потом всё уходит в континуум, где электрон движется отдельно от ядра. Переходы электрона с первого возбуждённого на основной уровень выдают большую энергию (ещё больше она при переходах с более высоких уровней на основной, но ненамного). **Серия переходов** электрона со всех возбуждённых уровней на основной называется серией **Лаймана**.

Энергия большая, кванты ультрафиолетовые, их и в лаборатории трудно увидеть, потому что они хорошо поглощаются, а из космоса мы их вообще очень редко получаем

– они поглощаются в атмосфере Земли. Поэтому лаймановская серия водорода стала известна довольно поздно.

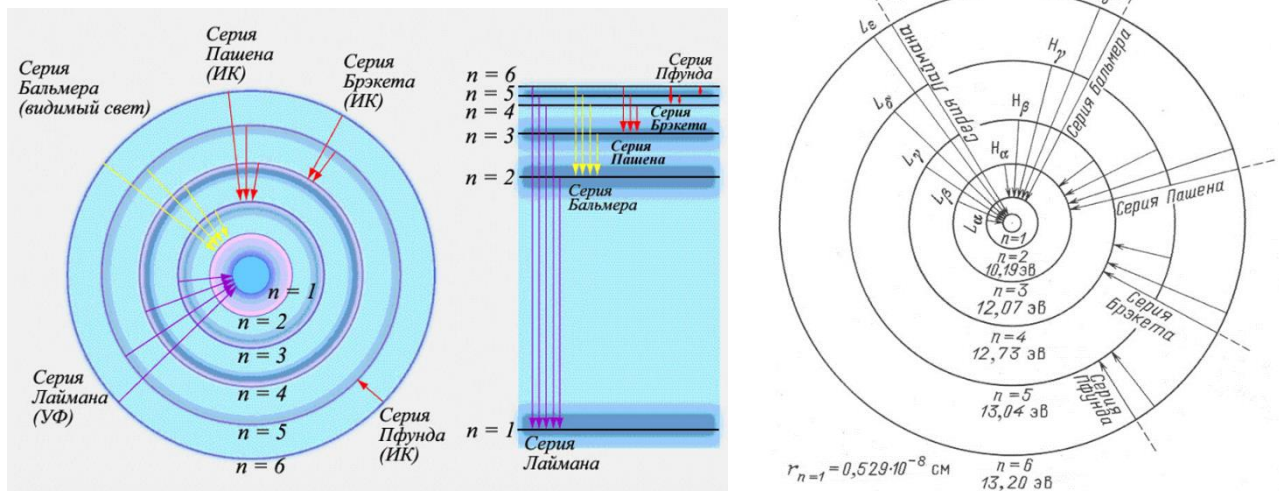


Рис. 7.9. а) строение атома водорода и серии электронных переходов, б) энергии переходов в атоме водорода

А вот переходы на первый возбуждённый уровень со всех вышележащих имеют маленькую энергию порядка 1–2 эВ, значит, длины волн от 400 до 600 нм. Это оптический диапазон, то есть видимый свет, который идёт через атмосферу и воспринимается глазами. Это серия **Бальмера**. Когда мы смотрим на спектр звезды и видим линии поглощения и излучения, как правило, это данная серия.

Переходы на второй возбуждённый уровень имеют совсем маленькую энергию. Это инфракрасные кванты, они тоже плохо проходят через атмосферу, да и лаборатории их стали поздно изучать. Эта и последующие серии – **Пашена**, **Брэкета**, **Пфунда**, то есть дальний инфракрасный диапазон, почти не представляют интереса для астрономии, которая работает на Земле.

Сейчас на орбиту полетел телескоп «James Web», который будет снимать в инфракрасных лучах, и для тех, кто с ним будет работать, эти переходы очень важны.

На рис. 7.9б показаны **энергии переходов**. Видно, что глаз человека чувствителен к квантам с энергией от 2 до 3 эВ, и атмосфера пропускает примерно этот диапазон.

Обратим внимание, что, когда открыли водород и стали изучать его спектр, линии обозначили названием самого химического элемента ( $H_\alpha, H_\beta \dots$ ), а дальше стали называть по фамилиям учёных ( $L_\alpha, L_\beta \dots$ ).

О чём нам говорит распределение яркости (или темноты) в одной спектральной линии? Сильно увеличим спектр так, чтобы было чётко видно **яркую линию** (рис. 7.10а). У неё конечная ширина, и её можно представить кривой, не всегда симметричной. У такой линии есть центр и крылья. Центр говорит о том, на какой длине волны максимум излучения. А форма крыльев – о том, как взаимодействуют друг с другом атомы.

Например, в плотном газе крылья очень широкие, потому что атомы сталкиваются и заставляют друг друга излучать на разных частотах. Также форма крыльев говорит о наличии магнитного поля (эффект Штарка, Зеемана), вращении звезды и т. д.

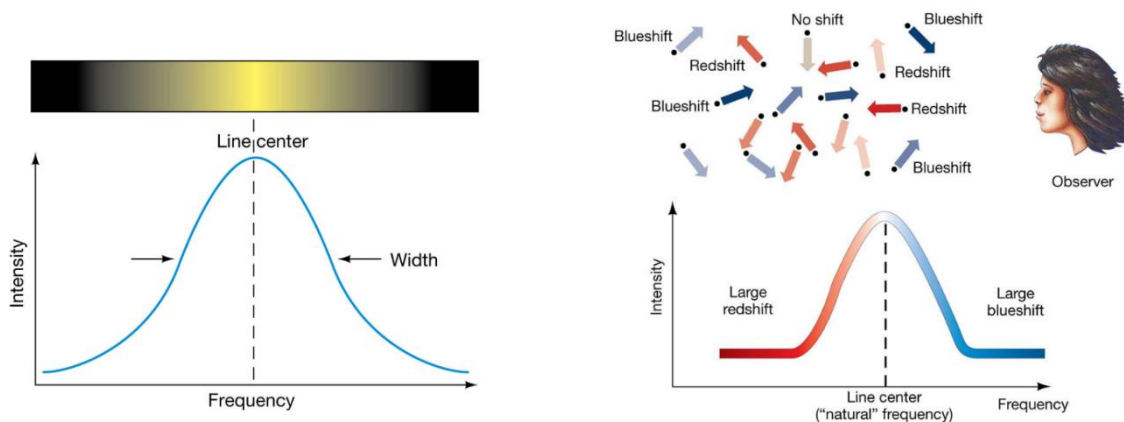


Рис. 7.10. (а) увеличенная линия спектра, (б) расширение линии в зависимости от температуры

Самый простой эффект – температурный (рис. 7.10б). От температуры зависит хаотическая скорость движения атомов. Всегда одна группа атомов движется к нам, другая от нас, и доплеровский эффект расширяет линию тем больше, чем выше температура. Астрономы нечасто используют это как индикатор температуры, потому что этот эффект часто поглощается другими.

Но в принципе хаотическое движение атомов прежде всего расширяет линию по отношению к её естественной частоте. Правильнее говорить «к её естественной форме», ведь даже если возбудить лазером холодный газ, линия всё равно будет иметь конечную ширину, потому что существует принцип неопределённости Гейзенберга. Естественная ширина всегда небольшая, а тепловое движение расширяет намного сильнее.

Существует эффект движения источника света. Если есть двойная система, яркий источник, которой даёт основной спектр, второй источник мало что добавляет, но заставляет этот источник двигаться. Будет периодическое смещение не только линий, но всего спектра (рис. 7.11а).

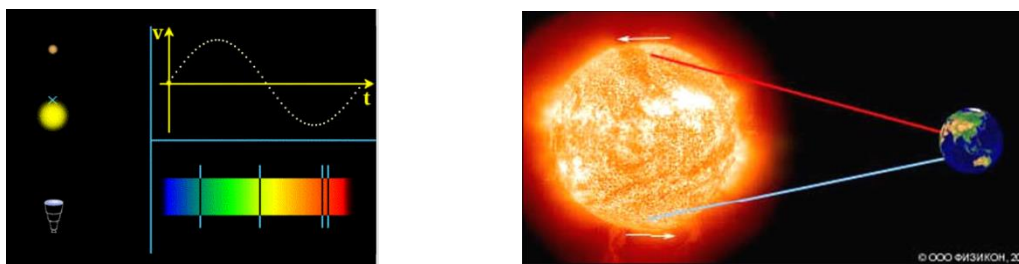


Рис. 7.11. (а) – эффект движение источника, (б) – Солнце как протяжённый объект

Даже если в спектре звезды почти нет линий, одногорбая кривая будет смещаться, потому что смещаются все частоты вправо или влево в зависимости от того, к нам или от нас по лучу движется источник света.

Мы видим Солнце как протяжённый объект (рис. 7.11б), а далёкие звёзды видим просто точками и проваливаем весь идущий от них свет в объектив телескопа. Получается смешение, то при этом свет, идущий от одного и от другого края звезды приведёт к тому, что **линии**, приходящие от одной и от другой части звезды немного **сместятся** по отношению к средней частоте, идущей от той области звезды, которая вращается перпендикулярно нашему лучу зрения (рис. 7.12).

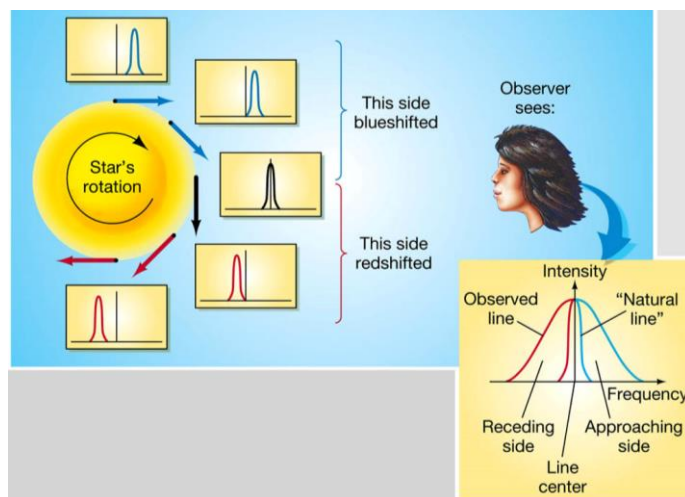


Рис. 7.12. Уширение спектральных линий, связанное с вращением звёзд

Это очень важный эффект, почти всегда только он позволяет измерять **скорость вращения звёзд**. Тепловое движение и вращение по-разному создают форму крыльев спектральной линии, и одно от другого можно отделить.

На рис. 7.13 показан вид **спектра Солнца**. Также там подписаны химические элементы, которые обеспечивают эти спектральные линии.

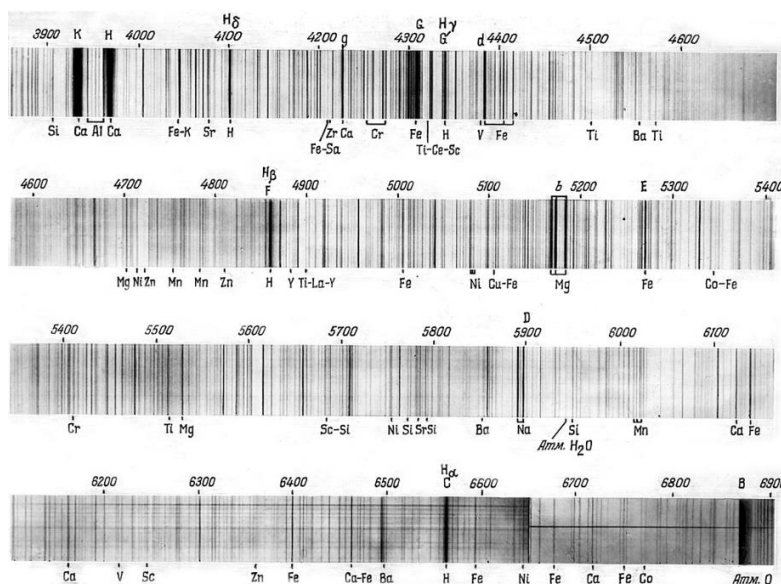


Рис. 7.13. а) спектр Солнца, б) спектр голубого неба

Можно заметить бальмеровскую серию водорода, но он несильно себя проявляет. Также там почти не видны линии гелия. Самые яркие линии – железо, кальций, алюминий, цинк. У астрономов с конца 19 в. до 30-х гг. 20 в. было впечатление, что поверхность Солнца состоит из металлов.

Теперь мы знаем, что четверть массы Солнца создаёт гелий и три четверти водород, а всё остальное добавляет к ней около 1,5%.

На рис. 7.14 представлен **спектр голубого неба**, то есть спектр рассеянного солнечного света. Поэтому форма голубого света, идущего от чистой атмосферы, более-менее повторяет солнечный спектр.

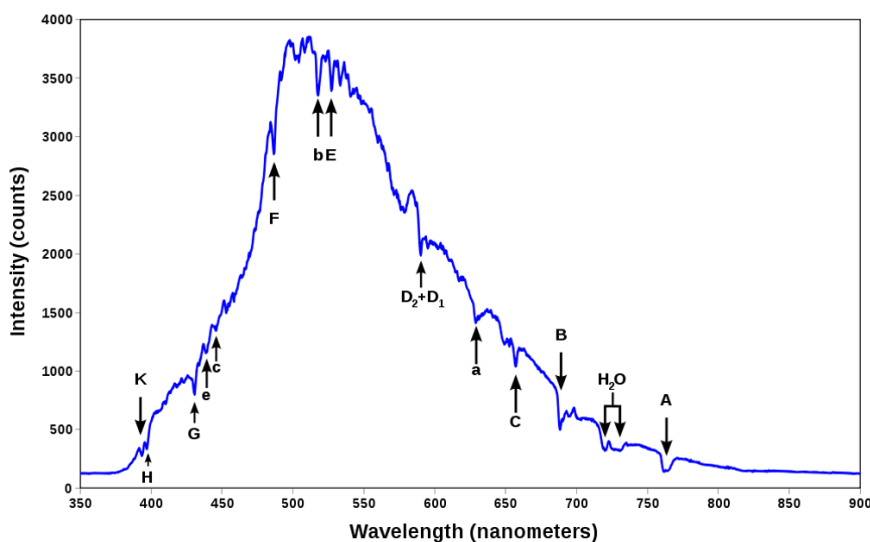


Рис. 7.14. Спектр голубого неба

В нём есть основные линии – водорода, калия, кальция и т. д., но в них ещё добавляются линии, присущие самой атмосфере. Атмосфера холодная, она сама не светится, но перехватывает часть солнечного света, поэтому это всегда линии поглощения. Можно увидеть пары воды, а также то, что поглощается дальше в инфракрасной области – азот, углекислый газ и др.

**Спектры других звёзд** ещё до появления фотографии изучали астрономы У. Хёггинс и А. Секки. Секки, просто глядя на спектры звёзд, понял, что бывают **разные типы** – с ярким красным концом, с яркой желтовато-зелёной областью и т. д. В 19 в. была введена самая примитивная классификация спектров по Секки, потом в 20 в. У. Пикерринг и его помощники начали массовую спектроскопию, и, основываясь на том, насколько интенсивны в спектре линии водорода, продолжили **классификацию** (рис. 7.15). Там сначала кроме линий водорода почти ничего нет, а потом водород уменьшается, появляются металлы, гелий и т. д. Это было до создания квантовой механики, когда ещё не понимали сам механизм излучения и поглощения, а просто смотрели на спектры и пытались разложить их по сходству или различию.

Типы по Секки	Первоначальные гарвардские спектральные классы (каталог им. Генри Дрэпера)	
I	A	сильные и широкие линии водорода
	B	подобен классу A, плюс "орионовы линии", замеченные у звезд в Орионе и позже отождествленные с нейтральным гелием
	C	сдвоенные линии водорода
	D	спектр с эмиссионными линиями
II	E	Фраунгоферовы линии H и K, а также линия H $\beta$
	F	подобен классу E, но видны все линии водорода
	G	подобен классу F, но с дополнительными линиями
	H	подобен классу F, но с понижением яркости в голубой области
	I	подобен классу H, но с дополнительными линиями
	K	спектр с молекулярными полосами
	L	особые формы и вариации класса K
III	M	тип III по Секки
IV	N	тип IV по Секки
Пикеринг	O	в основном эмиссионные линии
	V	планетарная туманность
	Q	все остальные (в 1922 г. определены как спектры Новых)

Рис. 7.15. Первоначальные спектральные классы

С появлением квантовой механики стали понимать, что в этой классификации нет физики. Мы до сих пор основываемся на этой классификации, но изменили порядок следования букв в соответствии с пониманием того, как излучают атомы.

На рис. 7.16 представлена современная гарвардская классификация. Здесь уже выдержан порядок роста температуры звёздной поверхности, потому что квантовая механика объяснила, как определять температуру газа в зависимости от того, линии каких химических элементов там представлены. Водород не всегда является надёжным индикатором этого, а относительная яркость (темнота) линий поглощения гораздо более точно свидетельствует о температуре.

Спектральный класс	Цвет	Температура, К	Особенности спектра	Типичные звезды
W	Голубой	80 000	Излучения в линиях гелия, азота, кислорода	$\gamma$ Парусов
O	Голубой	40 000	Интенсивные линии ионизированного гелия, линий металлов нет	Минтака
B	Голубовато-белый	20 000	Линии нейтрального гелия. Слабые линии H и K ионизированного кальция	Спика
A	Белый	10 000	Линии водорода достигают наибольшей интенсивности. Видны линии H и K ионизированного кальция, слабые линии металлов	Сириус, Вега
F	Желтоватый	7 000	Ионизированные металлы. Линии водорода ослабевают	Процион, Канопус
G	Желтый	6 000	Нейтральные металлы, интенсивные линии ионизированного кальция K и H	Солнце, Капелла
K	Оранжевый	4 500	Линий водорода почти нет. Присутствуют слабые полосы окиси титана. Многочисленные линии металлов	Арктур, Альдебаран
M	Красный	3 000	Сильные полосы окиси титана и других молекулярных соединений	Антарес, Бетельгейзе
L	Темно-красный	2 000	Сильные полосы SrH, рубидия, цезия	Ke1u-1
T	"Коричневый карлик"	1 500	Интенсивные полосы поглощения воды, метана, молекулярного водорода	Gliese 229B

Рис. 7.16. Современные спектральные классы

Недавно в этой классификации появились **дополнительные классы**, когда открыли совсем холодные звёзды с температурой всего несколько тысяч кельвинов (L, T). Сейчас обсуждается класс Y для звёзд с температурой 100 градусов по Цельсию. Есть коричневые карлики с температурой около нуля градусов по Цельсию.

Рассмотрим, как квантовая механика справилась с этой проблемой. На рис. 7.17а представлена **температурная шкала** от холодных звёзд к горячим. В астрономии рост температуры принято рисовать именно справа налево. А по оси у представлена интенсивность спектральных линий.

У холодных звёзд мы видим даже **линии молекул**, иногда даже молекул воды. Дальше начинаются **линии металлов**, например, кальция, потому что у металлов верхний электрон очень слабо связан с атомом, вследствие чего легко отскакивает и становится электроном проводимости. Из-за этого они даже при небольших температурах возбуждаются, начинают прыгать на второй-третий уровень.

Если нагревать ещё сильнее, линии металлов пропадают, потому что электрон уже отрывается, атом ионизуется. Зато начинает появляться **линия водорода**. Обозначение H I у спектроскопистов говорит о том, что водород нейтральный, у него электрон на месте, а обозначение H II – водород ионизованный, электрон оторван. Линий у H II быть не может. А вот у He II один электрон потерян, но второй ещё может прыгать, но такие линии будут только при очень высоких температурах. А He I нейтральный – оба электрона на месте, более связанный остаётся на месте, а менее связанный даёт линию.

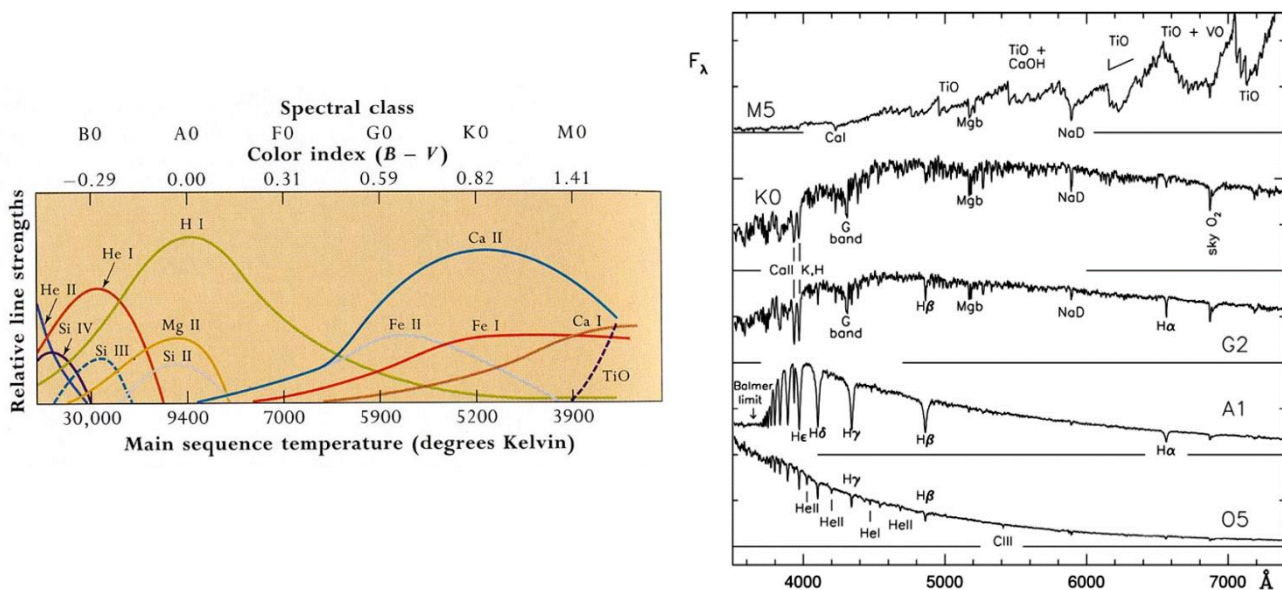


Рис. 7.17. а) спектральные линии элементов в зависимости от температуры звёзд, б) оптические спектры звёзд главной последовательности

У любого химического элемента есть **повышение** его **представительства** в спектре, а затем **понижение**. При температуре около 10 тыс. кельвинов водород ярко представлен своими спектральными линиями. До и после его нет. Значит, в звёздах

спектрального класса А в основном представлены линии водорода: гелия ещё нет, металлов уже нет.

После этого стало понятно, что **звёзды** не состоят из металлов, а **из водорода и гелия**, просто у холодных звёзд линии металлов хорошо видны. Впервые этот факт был надёжно доказан в диссертации С. Пейн.

Теперь рассмотрим спектры звёзд главной последовательности (рис. 7.17б). О, А, G, K – **основные спектральные классы**. Но оказалось, что они слишком грубые: внутри одного класса можно найти звёзды, значительно различающиеся по спектрам.

Поэтому каждый спектральный класс разбили на **10 интервалов**: A0 – A9, дальше F0 – F9 и т. д. Поэтому сейчас каждый спектр обозначается **буквой и цифрой**. Например, Солнце имеет спектральный класс G2.

Мы говорим не «молекулярные линии», а «**молекулярные полосы**». Это такой частотол линий, которые могут сливаться. Так происходит, потому что у молекул очень много вариантов возбуждения и, как следствие, излучения. У атома возможны только прыжки электрона, а у молекулы ещё масса движений, в которых может быть запасена энергия. Например, два атома могут вибрировать друг относительно друга с разной интенсивностью, и у них будет набор энергетических уровней; молекула может вращаться вокруг двух направлений, причём, изменяя скорость, молекула способна поглощать или излучать.

На рис. 7.18а показано, как выглядят **спектры**. Слева обозначение спектров, слева соответствующая им **температура** поверхности звезды. Видно, что если звезда холодная, широкие молекулярные полосы заслоняют собой огромные участки спектра, если горячая, то сначала линии тоненькие, а потом сливаются в континуум.

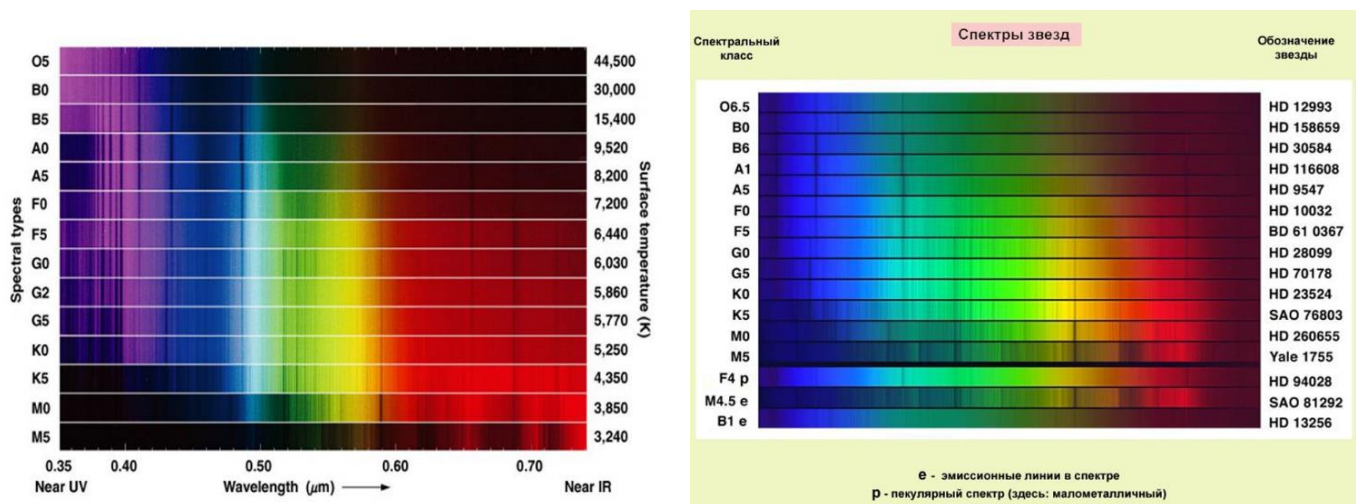


Рис. 7.18. а) спектры звёзд разных спектральных классов, б) особенности в спектрах звёзд

У некоторых звёзд бывают **особенности в спектрах**, и их надо как-то обозначать. При низких температурах очень небольшая вариация температуры приводит к довольно



значительному изменению внешнего вида спектра. Иногда приходится проводить **более мелкое деление спектров** – например, спектральный класс M4,5. Также появляются дополнительные буквы.

Часто возникает **p** – **пекулярный спектр**, то есть странный, особенный, а также **e** – **эмиссионный спектр**, то есть в нём можно заметить линии излучения, повышение яркости. Как правило, это связано с выбросами из звезды облаков разреженного горячего газа, либо просто с широкой короной и таким истечением.

Иногда бывают **многобуквенные обозначения** (рис. 7.18б). Например, F4 p Zn – спектр пекулярный, и в нём линии цинка необычно сильны, бывают такие высокометаллические пекулярные звёзды.

Понять, какие в спектре химические элементы, мы можем, а вот вопрос, почему у одних звёзд они есть, а у других нет, пока изучается.

Как правило, спектр всё-таки представляют не картинкой, а фотометрируют, то есть измеряют яркость вдоль спектра и потом представляют в виде **графика** (рис. 7.19). В таком виде удобнее различать детали, видеть тонкие спектральные линии.

Почти всегда у горячих звёзд виден **обрыв бальмеровской серии**, когда электрон уже легко отрывается от атома.

Электронные переходы внутри атома требуют точной настройки: должен лететь квант именно с той энергией, которая соответствует разности энергетических уровней, а все другие кванты пролетают мимо. Но если энергии кванта достаточно, чтобы оторвать электрон, любой более мощный тоже сможет это сделать. Получается уже не линия, а большой провал и континуум. Это аналог спектральной линии, он называется **бальмеровский скачок**.

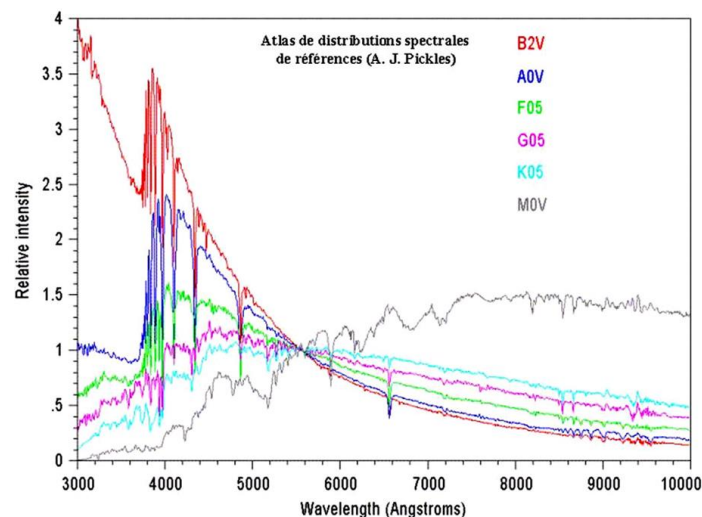
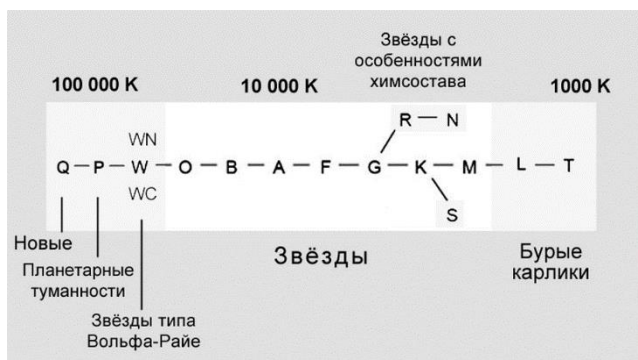


Рис. 7.19. Спектры в виде графика для звёзд разной температуры

Спектральная классификация звёзд постепенно становится многомерной. Ещё в сороковые годы 20 в. от некоторых **спектральных классов** звёзд возникли **ответвления**

(рис. 7.20а). Например, температура соответствует классу G, но избыток (реже недостаток) каких-то химических элементов приводит к тому, что по химическому составу он немного отличается.



Tab. 3.5.2.4. Die Unterklassen der Harvard-Klassifikation (teilweise aus [Jaschek & Jaschek, 1990])

WN					5	6	7	8	
WC						6	7	8	
O					4	5	6	7	8 9 9,5
B	0	0,5	1	2	3	5	7	8	9,5
A	0			2	3	5	7		
F	0			2	3	5	7	8	9
G	0			2		5		8	
K	0			2	3	4	5		
M	0		1	2	3	4		7	8 10
L	0		1	2	3	4	5	6	7 8 9
T	0		1	2	3	4	5	6	7 8 9

Рис. 7.20. а) ответвления от спектральных классов, б) десятичное подразделение спектров

Также есть **звёзды с особенностью строения**. Например, такие же горячие, как звёзды класса O, но окружены разреженной газовой оболочкой. А звёзды типа WN или WC горячие, как звёзды класса W, но в спектре сильно представлены азот или углерод соответственно.

После спектрального класса W идут ещё два. **P** – супер горячие звёзды с температурой 150–250 тыс. K – это обнажённые ядра постаревших звёзд, когда оболочка сброшена, а температура на ядре ещё очень высокая, то есть ядра планетарных туманностей. Есть ещё более горячий класс **Q** – звезда взорвалась вся или на поверхности произошла термоядерная вспышка, и она резко нагрелась, а потом будет остывать.

На рис. 7.20б представлены **спектры и их десятичное подразделение**. Но мы видим **пустые места**, то есть звёзд, которые могли быть классифицированы, например, как K7, в каталогах нет. За прошедшие с момента публикации таблицы 30 лет их тоже не обнаружили. Также можно заметить **M10**, который ввели, потому что следующий спектральный класс L0 уже не очень похож на M.

Спектры для исследований мы всегда получаем в чёрно-белом виде, потому что все приёмники монохромные, астрономическая ПЗС-матрица не содержит светофильтров. В **одноцветном спектре** более чётко видна его структура.

Иногда говорят, что **спектр Солнца** полностью расшифрован, то есть про каждую спектральную линию мы можем понять, какому химическому элементу она принадлежит. На самом деле спектр Солнца детально изучен, десятки тысяч линий отождествлены, есть ещё около **20 линий**, которые пока **не удаётся отождествить**. У некоторых элементов очень сложная структура энергетических уровней, к тому же у любой частицы есть спиновая структура.

На рис. 7.21а представлены **спектры горячих звёзд** от B до G, то есть горячее Солнца. Видны водородные линии.  $H_{\alpha}$  обычно не попадает, она очень красная, и наши

приёмники к ней не всегда чувствительны, а, начиная с  $H_\beta$ , бальмеровские линии всегда видны.

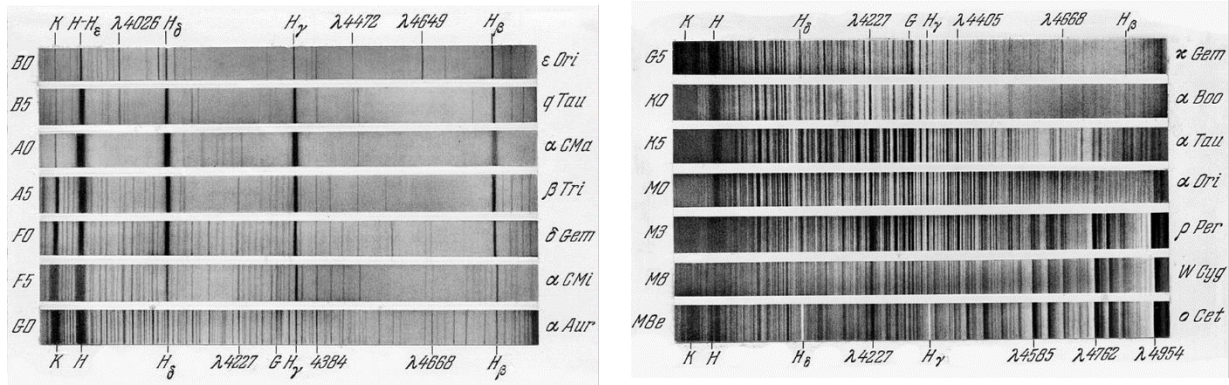


Рис. 7.21. а) настоящий одноцветный вид спектра, горячие звёзды, б) спектры холодных звёзд

А на рис. 7.21б представлена **холодная часть последовательности спектров** от солнечной температуры примерно до 3000 К. Здесь видно колоссальное количество спектральных линий и даже молекулярных полос.

Как правило, холодные спектры принадлежат либо очень маленьким звёздам, либо к очень постаревшим, у которых масса может быть большая, но звезда разрушается, и оболочка охлаждается. Но в последнем случае спектр эмиссионный: наружные области раздувшейся звезды полупрозрачные, от них уже не получить непрерывного спектра, но отдельные спектральные линии легко.

На рис. 7.22а представлены **спектры предельно горячих звёзд**. Линий водорода почти не видно, но линии гелия представлены довольно мощно.

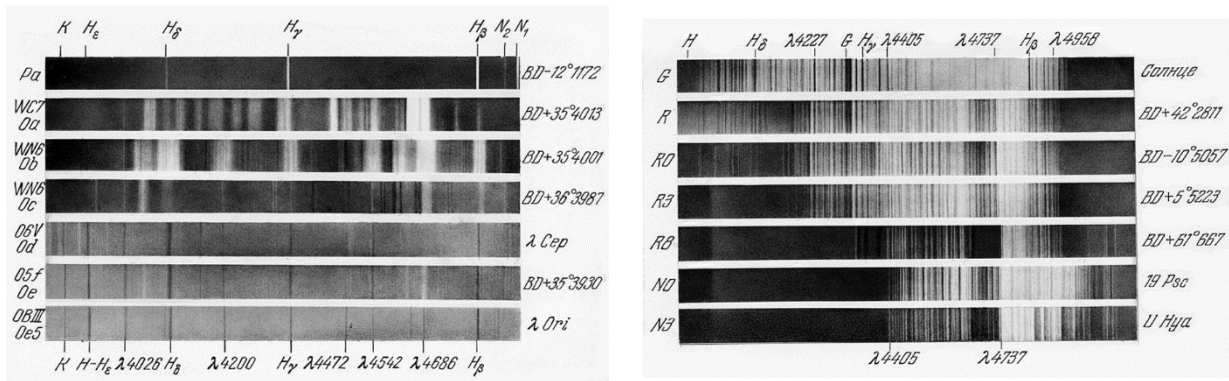


Рис. 7.22. а) спектры очень горячих звёзд, б) спектры звёзд с особенностями химического состава

И, наконец, на рис. 7.22б **спектры с особенностями химического состава**. Температура звёзд порядка солнечной, но есть много линий элементов, как правило, металлов, которые нехарактерны для других звёзд.

## Связь спектра и массы звезды

Когда С. Пейн расшифровала, как по относительной интенсивности спектральных линий судить о количестве атомов в атмосфере звезды, астрономы поняли, что **звёзды состоят по массе** на три четверти из водорода и на четверть из гелия (рис. 7.23а).

**Металлами** в астрономии называется всё, что в таблице Менделеева дальше гелия. Когда мы говорим «**металличность звезды**», «**степень металличности**», речь в основном идёт о элементах O, C, N и дальше вплоть до Fe, а иногда и дальше. Li и Be в природе почти нет. Всех этих элементов немного: на Солнце примерно 1,5%, есть чуть более металличные звёзды, более молодые, чем Солнце, там до 2%. А есть звёзды, где их меньше 0,001%.

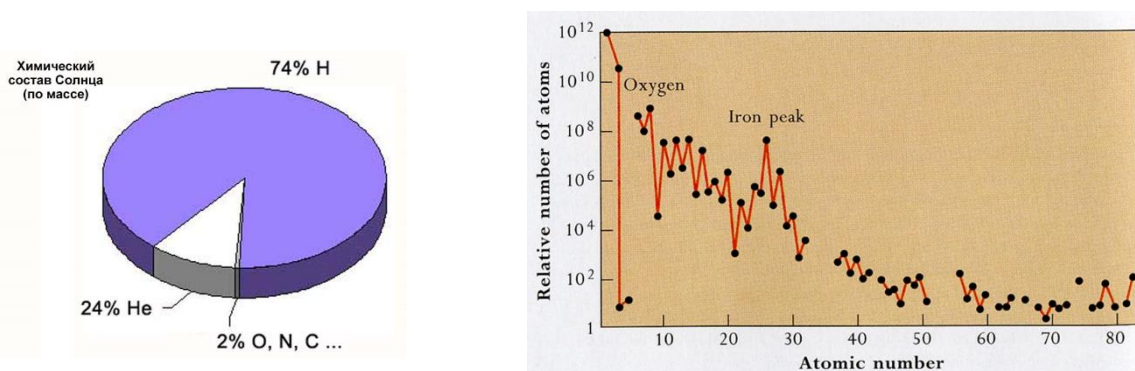


Рис. 7.23. а) химический состав Солнца по массе, б) содержание тяжёлых элементов в спектре Солнца

Но такая маленькая добавка всё же критически важна для жизни звезды. С появлением в составе тяжёлых элементов сильно меняется отношение вещества звезды к фотонам электромагнитного излучения. Водород и гелий очень плохо взаимодействуют со светом, они для него почти прозрачны. А у более **сложных элементов** много вариантов электронных переходов, и они хорошо **поглощают свет**, идущий из недр звезды.

Так что при наличии этих элементов звезда запирает внутри себя свет, **долго сохраняется** как источник термоядерной энергии. А звезда, состоящая из чистого водорода и гелия быстро из себя всё выпускает, горит ярко, но её период активной жизни продолжается недолго.

Спектр Солнца позволяет посмотреть, **что содержится в этих 2% и в каком количестве** (рис. 7.23б). У других звёзд примерно также. Водорода и гелия много, дальше большой провал, где литий, бериллий и бор. Это крайне редкие в природе элементы, потому что они хорошо сгорают в термоядерных реакциях. А дальше идёт довольно равномерный спад до урана.

Здесь можно заметить **периодичность**. пилообразная форма кривой связана с тем, что ядра химических элементов, содержащие чётное или нечётное количество нуклонов, по-разному разрушаются и синтезируются в термоядерных реакциях. Ядра с чётным

количеством нуклонов более прочные (например, ядро гелия), поэтому таких элементов больше.

Кроме того, виден **пик** там, где **железо** и близкие к нему элементы. Это связано с тем, что ядро железа хорошо связано, до него синтез идёт, а дальше нет. Поэтому железо и никель накапливаются.

Когда спектральная классификация для тысяч звёзд была создана (Гарвард, начало 20 в.), примерно тогда же были измерены первые параллаксы звёзд. Параллакс даёт расстояние, видимый блеск звезды и расстояние позволяют вычислить её абсолютную светимость.

Сравним две характеристики звезды: **спектральный класс** – это температура поверхности, а **абсолютная звёздная величина** – светимость звезды.

Впервые на такую плоскость измеренные точки нанесли астрономы Г. Рассел и Э. Герцшпрунг, и в честь них её называют **диаграммой Герцшпрунга-Рассела**. Это очень важная вещь в астрономии, потому что для большинства звёзд мы имеем возможность узнать только эти две характеристики.

Герцшпрунг и Рассел отметили **два факта**. Звёзды распределены более-менее по диагонали: холодные имеют малую светимость, горячие – высокую. Это было ожидаемо, но непонятно было, почему есть группа звёзд, имеющих невысокую температуру поверхности, но высокую светимость. Из этого следовало, что они имеют большой размер, иначе при низкой температуре поверхности много света не излучить. Их назвали красными гигантами. Также было некоторое количество звёзд (тогда была известна только одна, Сириус В), которые являлись маленькими, но горячими. Их назвали белыми карликами.

Это требовало **объяснения**, и в течение 20 в. их предлагалось много, причём кардинально разных. На рис. 7.24 мы видим современную диаграмму, но на ней добавился только один параметр: зная светимость и температуру, можно вычислить размер звезды, и здесь нанесены линии равного размера по отношению к радиусу Солнца.

Одни исследователи говорили, что звезда рождается большой, массивной, горячей, ярко светит, а по мере жизни остывает, движется вдоль этой траектории, и в итоге её жизнь кончается. Тогда уже была известна теория Энштейна,  $E = mc^2$ , и они считали, что излучение уносит массу звезды, и мы видим последовательность – путь звёзд.

Другие говорили, что звезда рождается маленькой, а потом, путешествуя по космосу, набирает массу – проходя через облака межзвёздного газа, она притягивает его, яркость тоже увеличивается, поэтому движение идёт с нижнего конца последовательности на диаграмме вверх.

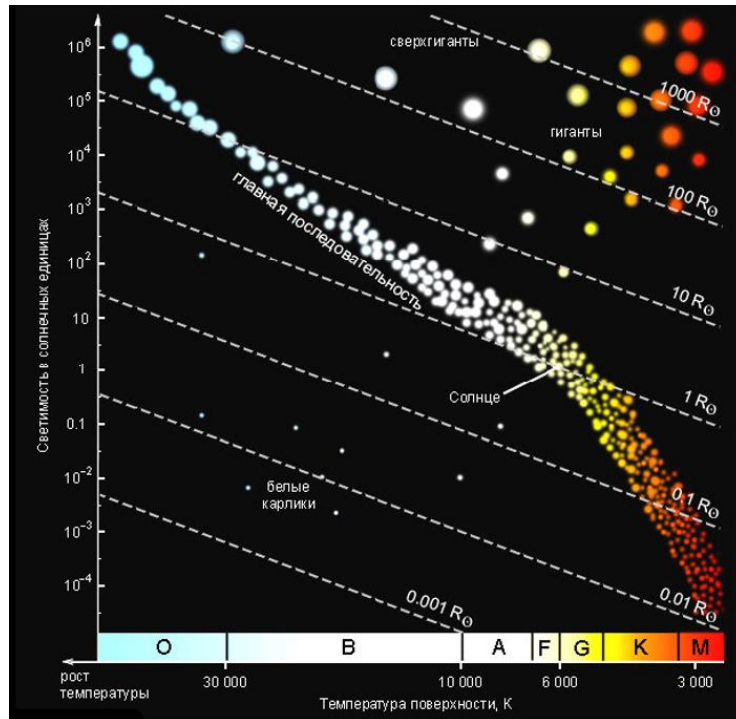


Рис. 7.24. Современная диаграмма Герцшпрунга-Рассела с линиями размера

На рис. 7.25а представлен примитивный вид диаграммы Герцшпрунга-Рассела, где указаны только основные последовательности. У профессиональных астрономов обычно используется более детальный вид диаграммы (рис. 7.25б), где есть промежуточные категории.

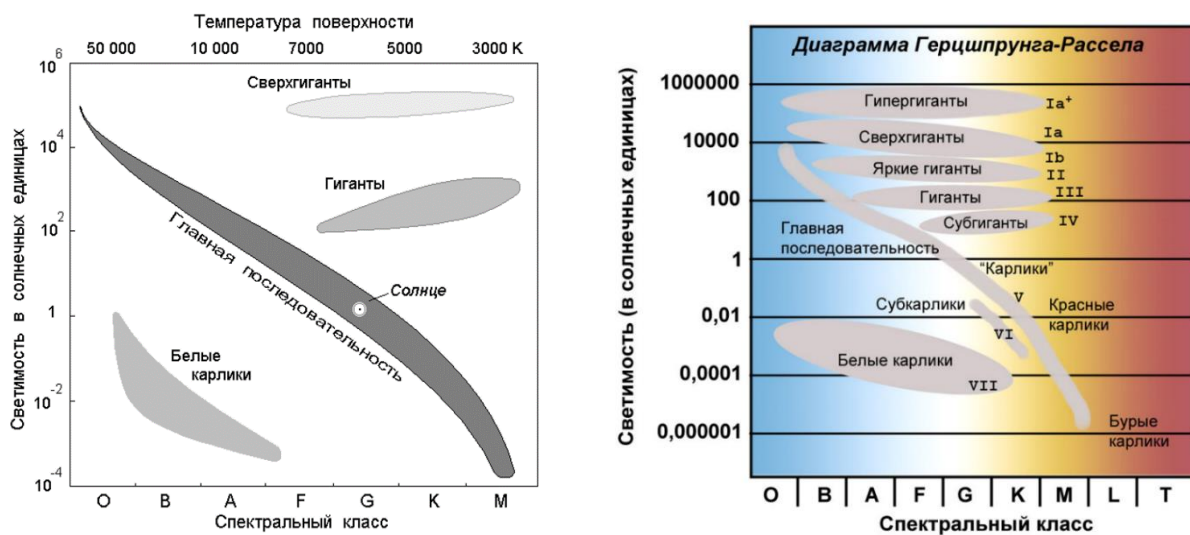


Рис. 7.25. Упрощённая (а) и более детальная (б) диаграмма Герцшпрунга-Рассела

Выяснилось, что звёзды в течение жизни не путешествуют не вдоль главной последовательности, а перпендикулярно ей. Первым это показал М. Шварцшильд. Звезда долго живёт в каком-то месте главной последовательности, потом прыгает вверх

и вправо, раздуваясь перед смертью, а когда сбрасывает оболочку, её ядро оказывается в нижнем левом углу.

На рис. 7.26 представлены **светимости звёзд разных спектральных классов**, а также здесь указан **процент этих звёзд** на фоне всех остальных. Более 80% звёзд в Галактике – очень холодные красные карлики. А невооружённым глазом мы обычно видим звёзды классов А, В, О, и они составляют даже в сумме менее 1% от всех звёзд.

Объяснить теоретически, почему звёзды распределены именно так, не удалось, хотя **несколько моделей** представлены. Если взять машину, которая что-то измельчает, а потом разложить кусочки по массе, распределение будет точно соответствовать распределению звёзд по массе, несмотря на то, что физика данных процессов разная.

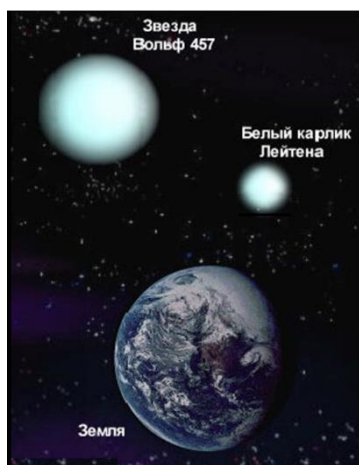
Class	Temperature	Conventional color	Apparent color	Mass $M_{\odot}$	Radius $R_{\odot}$	Luminosity $L_{\odot}$	Hydrogen lines	% of all MSSs
<b>O</b>	30,000–60,000 K	blue	blue	60	15	1,400,000	Weak	~0.00003%
<b>B</b>	10,000–30,000 K	blue white	blue white to white	18	7	20,000	Medium	0.13%
<b>A</b>	7,500–10,000 K	white	white	3.1	2.1	80	Strong	0.6%
<b>F</b>	6,000–7,500 K	yellowish white	white	1.7	1.3	6	Medium	3%
<b>G</b>	5,000–6,000 K	yellow	yellow	1.1	1.1	1.2	Weak	8%
<b>K</b>	3,500–5,000 K	orange	yellow orange	0.8	0.9	0.4	Very weak	13%
<b>M</b>	2,000–3,500 K	red	orange red	0.3	0.4	0.04	Very weak	>78%

Рис. 7.26. Характеристики звёзд главной последовательности

Размер **белых карликов** как у нормальных планет, хотя масса может достигать массы Солнца, поэтому плотность огромная (рис. 7.27а). Например, Солнце в 109 раз больше Земли по диаметру, значит, по объёму в миллион раз. У Солнца средняя плотность  $1,5 \text{ г/см}^3$ , а у Земли  $5,5 \text{ г/см}^3$ . Значит, у белых карликов плотность может быть  $1 \text{ млн г/см}^3$ , то есть в  $1 \text{ см}^3$  типичного белого карлика тонна вещества. А у нейтронных звёзд плотность ещё в миллион раз выше. Вещество белых карликов нельзя получить в лаборатории, потому что нельзя так сжать тонну.

Открыты и изучены с поверхности десятки тысяч таких звёзд. **Некоторые белые карлики** с их параметрами представлены в таблице на рис. 7.27б. Отметим, что для белых карликов названия спектральных классов другие.

Ширина спектральной линии иногда позволяет **различить карликов и гигантов**, хотя температура поверхности у них может быть одинаковой. Представим, что мы увидели на небе красную или желтовато-красную звезду и хотим узнать, какое до неё расстояние. Видимый блеск мы знаем, но для определения расстояния надо знать ещё и светимость, то есть решить, она красная, потому что в нижней части главной последовательности, или потому что это гигант или сверхгигант.



Название	Прямое восхождение	Склонение	Спектральный класс	Параллакс
Проксима Центавра С	14h 26m	- 62° 28'	M5	0,762"
α Центавра А	14 36	- 60 38	G2	0,745
α Центавра В	14 36	- 60 38	K5	0,745
Барнарда	17 55	+ 4 33	M5	0,552
Wolf 359	10 54	+ 7 19	M8	0,429
Сириус А	6 43	- 16 39	A1	0,377
Сириус В	6 43	- 16 39	DA	0,377
Ross 154	18 47	- 23 53	M4	0,345
61 Лебедя А	21 C5	+ 35 30	K5	0,294
61 Лебедя В	21 C5	+ 35 30	K7	0,294

Рис. 7.27. (а) сравнение размеров белых карликов и Земли, (б) – сравнение параметров белых карликов и других звёзд

Тогда смотрим на **спектральные линии** (рис. 7.28). Если они широкие, это говорит о том, что атомы плотно упакованы в атмосфере звезды, тесно взаимодействуют друг с другом, мешают друг другу излучать или поглощать строго на определённых частотах (рядом другой атом, у него своё электрическое поле, которое меняет картину электрического поля данного атома, и он начинает поглощать немного на других частотах). Высокая плотность атмосферы у белых карликов.

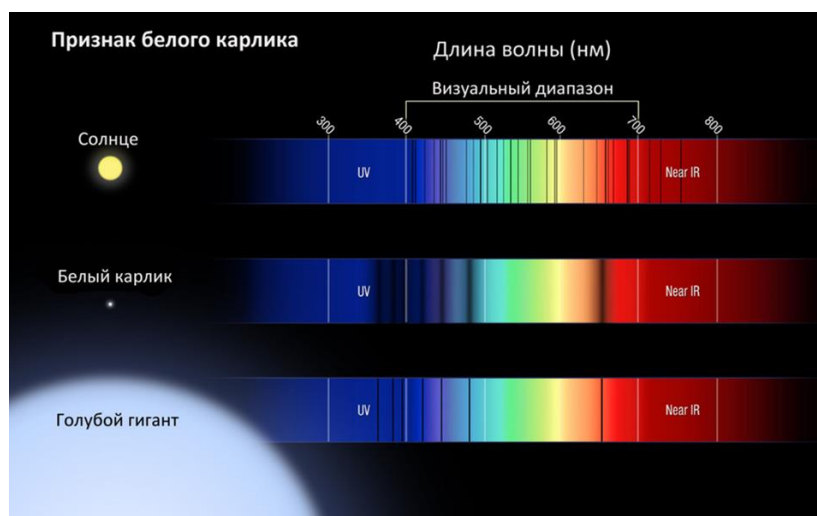


Рис. 7.28. Сравнение спектров Солнца, белого карлика и голубого гиганта

Соответственно, тонкие линии говорят о том, что атомы в атмосфере звезды друг с другом не взаимодействуют, каждый атом излучает или поглощает на строго предписанной ему длине волны, и это всё ложится в одно место спектра.

На рис. 7.29 представлено **сравнение спектров гиганта и карлика**. Температура одна и та же, потому что относительная интенсивность линий одинаковая, но ширина линий разная.



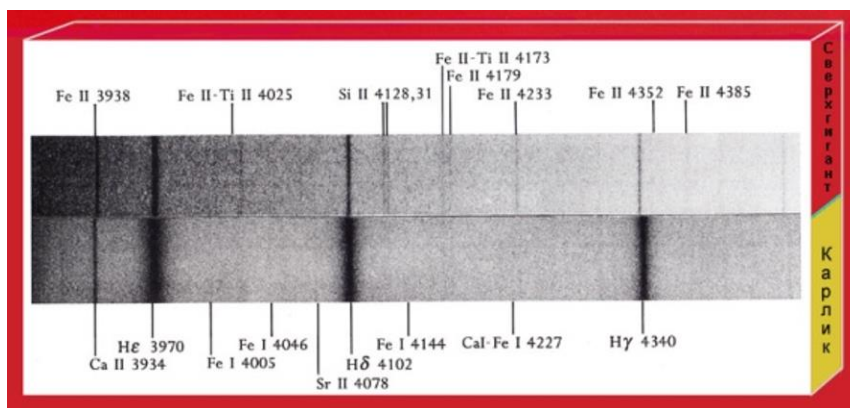


Рис. 7.29. Сравнение линий в спектрах карлика и гиганта

Ближайшие к нам звёзды, как правило, похожи на Солнце, либо ещё более мелкие. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела на рис. 7.30а довольно точно представляет реальную диаграмму ближайших к нам нескольких тысяч звёзд. На рисунке отмечена двойная система  $\alpha$  Кентавра и их третий член Проксима, и даже можно заметить, что уже вырисовываются эволюционные направления движения звёзд. Видно, что они уходят вверх из главной последовательности, сбрасывают оболочки, ядро движется в область белых карликов, медленно остывает и когда-нибудь станет маленькой красной звёздочкой.

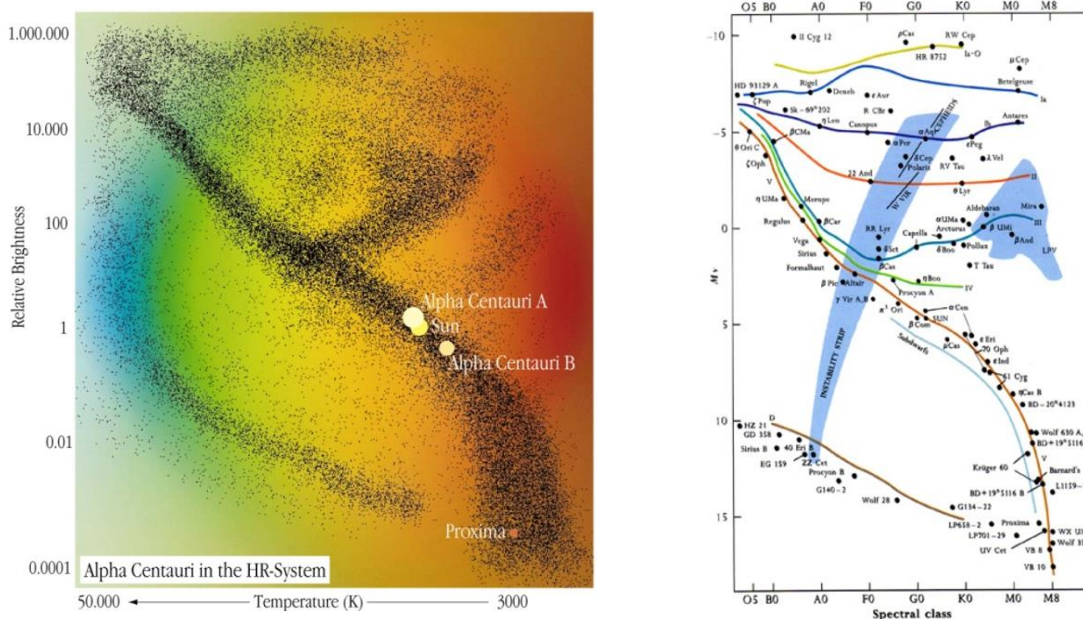


Рис. 7.30. (а) – эволюционные направления движения звёзд, (б) – полоса неустойчивости

Детальная диаграмма показана на рис. 7.30б, и там точками обозначены конкретные звёзды. Большинство звёзд на главной последовательности, то также среди знакомых нам много гигантов и сверхгигантов, потому что у них высокая светимость, и их видно издалека.

Здесь же широкими полосами нарисованы очень важные места на диаграмме. Длинная полоса примерно соответствует классам от F до A, а при низких плотностях атмосферы ещё и G. Это **полоса неустойчивости**. Как мы помним, звезда движется, уходит с главной последовательности, может несколько раз ходить туда-сюда. А попадая в полосу неустойчивости, звезда теряет устойчивость.

Обычно звёзды неизменны, но именно при такой температуре и светимости в атмосфере звезды возникает клапанный механизм. Обычно в этом участвует слой гелия, который становится то прозрачным, то непрозрачным для проходящего через него снизу света. Прозрачность зависит от того, насколько газ ионизован. Газ начинает работать как автомобильный клапан, который принимается раскачивать звезду в районе атмосферы. И мы видим внизу пульсирующие белые карлики, а выше пульсирующие гиганты. Например, у Цефеид период пульсации связан со светимостью, и мы по нему узнаём расстояние до них.

**Внутреннее строение звёзд** тоже зависит от того, в каком месте диаграммы они оказались (рис. 7.31). Обычные звёзды главной последовательности имеют большое ядро (то место, где происходят термоядерные реакции) и оболочку, через которую выработанное тепло в виде квантов света или конвективного потока газа просачиваются наружу. А у гигантов очень маленькое ядро, на поверхности которого происходят термоядерные реакции. Внутри него уже всё сгорело, там зола термоядерного процесса, всё превратилось в железо или близкие к нему элементы. Ядро окружает очень протяжённая полупрозрачная атмосфера с красной поверхностью. А белые карлики сами представляют ядро звезды.

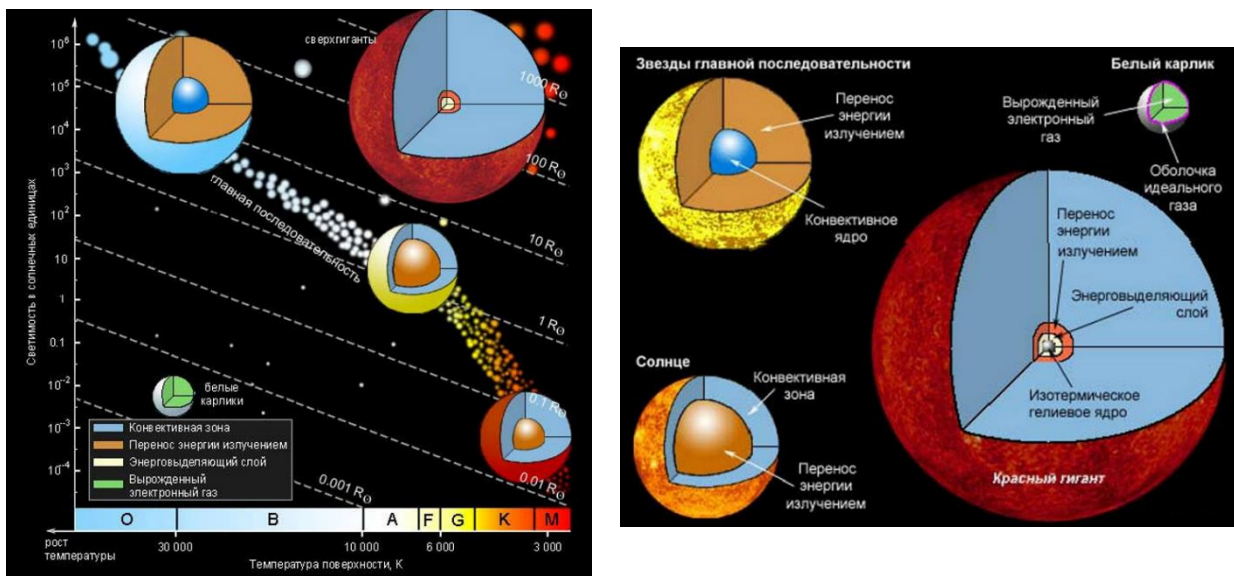


Рис. 7.31. Внутреннее строение звёзд разного размера

Было очень важно понять **связь между светимостью звезды и её массой**. Массы звёзд измерять трудно, надо находить двойные системы, точно определять орбитальные периоды, размеры. Но постепенно такая информация накопилась, и теперь, определив

светимость звезды, мы можем сказать, какая у неё масса без её прямого измерения (рис. 7.32).

Заметим, что шкала логарифмическая, и на ней видно несколько изломов. Светимость сначала нарастает медленно, затем быстро, и дальше всё медленнее и медленнее. Если же рассматривать звёзды с массой 60-100 Солнца, она из логарифмической вообще становится линейной.

Это очень важно, потому что по светимости мы определяем **интенсивность термоядерных реакций**.

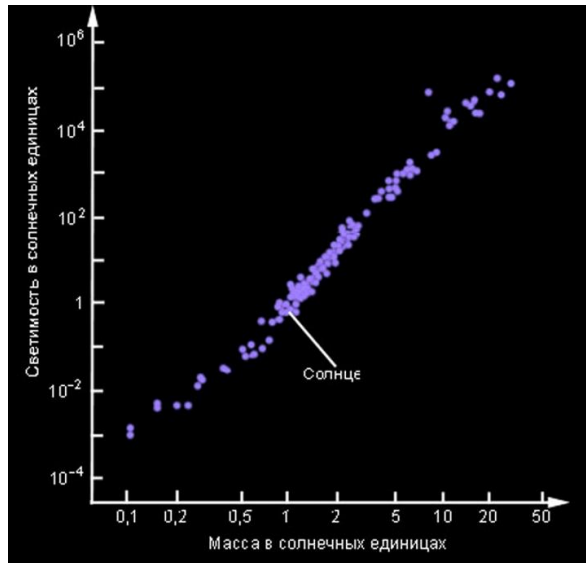


Рис. 7.32. Связь между массой звезды и светимостью

В старых звёздных агрегатах, например, скоплениях, где звёзды когда-то одновременно родились и дальше там живут, мы видим **диаграмму Герцшпрунга-Рассела** в такой странной форме, как на рис. 7.33а.

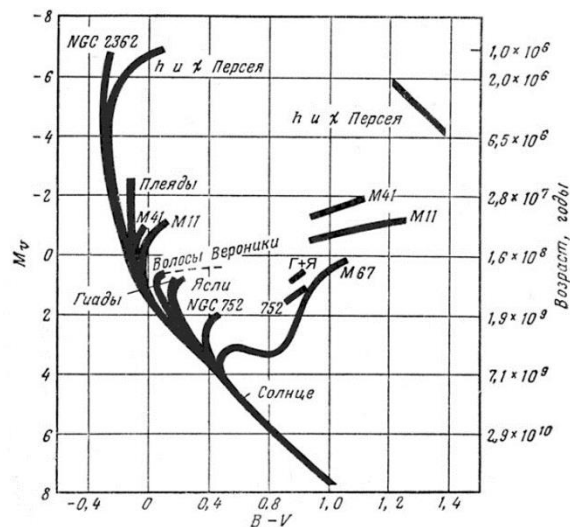
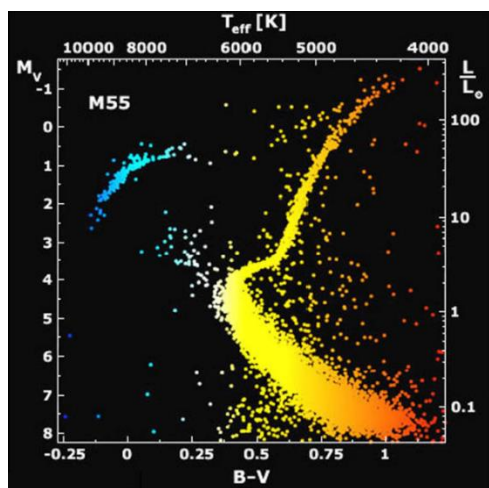


Рис. 7.33. (а) диаграмма Герцшпрунга-Рассела старых звёздных агрегатов, (б) отходящие от главной последовательности звёздные ветви

На ней из правого нижнего угла вверх идёт главная последовательность, дальше её звёзды расширяются, и в правый угол идёт ветвь гигантов. Затем звёзды идут вниз и влево на горизонтальную ветвь, иногда возвращаются обратно на асимптотическую, дальше очень быстро перепрыгивают в область белых карликов. Анализ таких диаграмм помогает понять, как эволюционируют звёзды.

Если взять диаграмму Герцшпрунга-Рассела разных звёздных скоплений и сложить их так, чтобы нижние части главной последовательностей были на одинаковом уровне, мы увидим, что **отходящие от главной последовательности населённые звёздами места у разных скоплений разные** (рис. 7.33б). Так происходит, потому что маленькие звёзды долго эволюционируют, медленно сжигают водород, а звёзды большой массы имеют гигантскую светимость и сжигают быстро.

Поэтому, когда скопление рождается (вверху представлены самые молодые), главная последовательность заселена звёздами любой массы, а потом массивные первыми уходят в область гигантов и сбрасывают оболочку. Потом скопления более старые (например, Плеяды), у них уже остались только менее массивные звёзды. Чем старше скопление, тем меньше у него протяжённость нижней части главной последовательности.

Справа на диаграмме шкала возраста. По месту, где обрывается главная последовательность, можно примерно оценить **возраст скопления**.

Посмотрим на то, какие **параметры у звёзд** разной массы, находящихся **на главной последовательности** (рис. 7.34). Видно, что массивные звёзды живут несколько миллионов лет, звёзды маленькой массы миллиарды лет, а самые лёгкие – больше триллиона. Мы сегодня видим в Галактике и большие звёзды, и маленькие, и лёгкие, и массивные, а это значит, что они продолжают рождаться в нашу эпоху.

Масса, $M_{\odot}$	Радиус, $R_{\odot}$	Светимость, $L_{\odot}$	Температура, К	Спектральный класс	Время жизни, лет
120	15,8	1 800 000	53 300	O3	3 млн
60	10,6	530 000	48 200	O4	4
27	8,5	140 000	38 000	O7	8
16	5,7	16 000	32 000	B0	13
8,3	4,8	2 500	17 000	B3	34
5,4	3,7	750	15 000	B5	80
3,5	2,7	130	12 500	B8	220
2,6	2,3	63	9 500	A0	480
2,2	2,0	40	9 000	A2	770
1,8	1,7	11	8 100	A7	1 400
1,5	1,3	6,3	7 100	F2	2 500
1,2	1,1	2,5	6 100	F8	5 300
1,0	1,00	1,10	5 800	G2	10 млрд
0,85	0,87	0,44	5 300	G8	18
0,78	0,79	0,28	4 830	K2	25
0,58	0,67	0,12	3 900	K8	70
0,47	0,63	0,075	3 670	M0	150
0,33	0,36	0,030	3 400	M2	230
0,2	0,21	0,005	3 200	M4	800

Рис. 7.34. Параметры звёзд главной последовательности

## Межзвёздные молекулярные облака и рождение звёзд

На рис. 7.35 показана **шкала времени** от нашего к началу жизни вселенной. Мы видим древние звёздные скопления и даже те области, где на наших глазах рождаются звёзды.

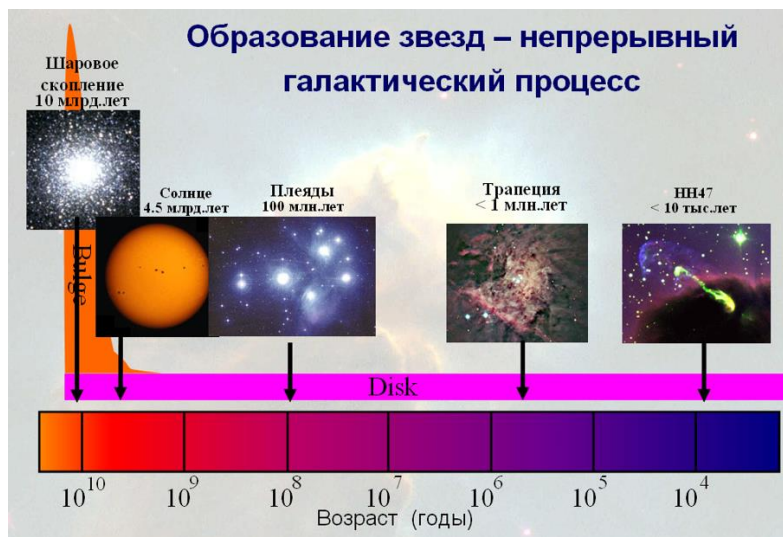


Рис. 7.35. Время рождения звёзд на шкале

Старые звёзды **теряют газ** – на рис. 7.36а показано, как это делает Солнце, и из него могут рождаться новые поколения звёзд. В галактике мы иногда видим это вещество хорошо уплотнённым в **облака** – на рис. 7.36б представлена **туманность Ориона**.

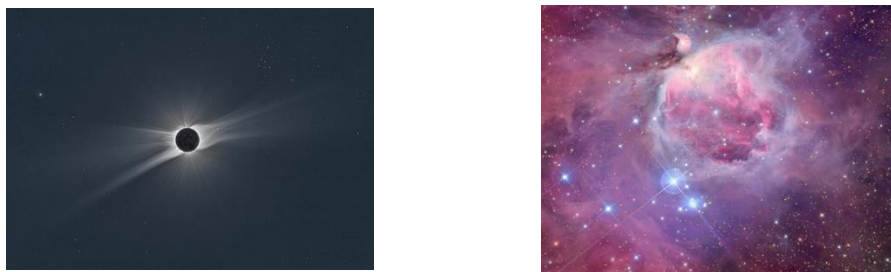


Рис. 7.36. (а) – Солнце теряет газ, (б) – туманность Ориона

Надо было объяснить, как из разреженного газа, потерянного предыдущими поколениями звёзд, могут рождаться следующие. Первым это объяснил И. Ньютон. Создав в 1692 г. **теорию тяготения**, он понял, что если в однородной среде есть небольшие уплотнения, то именно туда будет устремляться соседний газ, и они будут расти. Таким образом, Ньютон на словах создал **теорию гравитационной фрагментации**, то есть распада непрерывной сплошной среды на отдельные фрагменты. А начальные неоднородности всегда есть в природе.

**Математическую теорию** этого уже создал Дж. Джинс в 1902 г. Он записал уравнения звука, то есть распространения волны сжатия в непрерывной среде, добавив туда ещё один член – гравитацию этого газа.

Но мы сейчас это не будем делать, а просто рассмотрим, как себя ведёт **газовое облако**. Там есть **два противоборствующих эффекта**: один стремится расширить газ – газовое давление, а другой сжать – гравитация. Какой быстрее работает, тот и победит.

Чтобы определить, за какое время облако расширится, надо поделить его размер на скорость звука. Скорость звука – это скорость движения молекул в газе, то есть **динамическое время** газового облака. Оно зависит только от температуры газа:

$$t_{dyn} = \frac{\lambda}{v_s}$$

Для противоборствующей силы – гравитации – смотрим **время свободного падения**. Отключаем газовое давление и определяем, за какое время гравитация значительно сожмёт облако, желательнее в точку. Третий закон Кеплера позволяет нам это сделать. Каждая точка на поверхности облака движется по эллипсу с эксцентриситетом, близким к единице, то есть фактически падает по прямой к центру, тогда формула для времени свободного падения выглядит так:

$$t_{ff} = \pi \sqrt{\frac{\lambda^3}{GM}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

В формуле  $\pi$ , а не  $2\pi$ , потому что надо пройти только половину пути по эллипсу.

Дальше смотрим, какое время победит. В отношении остаётся только размер облака:

$$\frac{t_{dyn}}{t_{ff}} \sim \lambda$$

В больших облаках преимущественно работает гравитация, а в маленьких газовое давление, взаимодействие частиц.

Теперь мы называем эти **критические параметры** – размер  $R_y$  и массу  $M_y$  – джинсовскими. Их можно найти, приравняв два времени друг к другу. Полученные значения можно выразить через характерные параметры межзвёздной среды – размер Солнечной системы и массу Солнца:

$$R_y = 0,06 \text{ пк} \left( \frac{T}{10 \text{ К}} \cdot \frac{10^4 \text{ см}^{-3}}{n_{\text{H}_2}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad M_y = 0,4 M_{\text{Сол}} \left( \frac{T}{10 \text{ К}} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{10^4 \text{ см}^{-3}}{n_{\text{H}_2}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Но для этого нужно, чтобы газовая среда была очень холодной (десятки кельвинов) и очень плотной (десятки тысяч частиц, например, молекул водорода) в кубическом сантиметре.

К сожалению, сам Дж. Джинс не мог найти в астрономических данных таких холодных и плотных облаков. К 1920 г., когда он работал, было известно, что есть **горячие (тёплые) газовые облака HI-III** – из нейтрального или ионизованного

водорода (рис. 7.37). Если подставить их параметры в формулы, получим совершенно невероятные критические размер и массу. Таких звёзд мы никогда не видели.

К 1950 г. уже открыли **прохладный газ** и облака **нейтрального водорода** с гораздо меньшей температурой и большей плотностью. Звёзд, имеющих массу в 2000 раз больше, чем Солнце, тогда не знали, а вот звёздные скопления – Плеяды, Геады и др. – именно такие массы и имеют, да и размеры у них порядка 10 пк. К 1970 г. открыли очень **горячий полностью ионизованный газ**, который окружает нашу Галактику, но тут масса получилась как полная масса Галактики. А в середине 70-х открыли **облака из молекул водорода** и других, у них были низкие температуры и высокие плотности, и критические параметры уже стали соответствовать звёздам.

Год открытия	Фаза	Температура, К	Плотность, см <sup>-3</sup>	$M_J$ , $M_\odot$	$R_J$ , пк
1920	Теплая, HI-HII	8000	0,25	$1 \times 10^8$	$2 \times 10^3$
1950	Прохладная, HI	80	40	$2 \times 10^3$	7
1970	Горячая, HII	$3 \times 10^5$	0,002	$5 \times 10^{11}$	$2 \times 10^5$
1975	Холодная, H <sub>2</sub>	10	$10^3$	4	0,3

Рис. 7.37. Основные фазы межзвёздной среды и их параметры Джинса

То есть только с конца 70-х мы нашли тот компонент межзвёздной среды, из которого реально могут рождаться звёзды. Горячим газом заполнено всё, но, если приглядеться к чёрным точкам и областям на рис. 7.38а, можно увидеть **плотные холодные облака**.

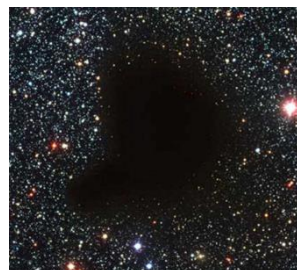


Рис. 7.38. (а) – чёрные холодные области на фоне горячего газа, (б) – плотное межзвёздное вещество

На рис. 7.38б видно, что такая среда настолько плотная, что вообще непрозрачна для солнечного света.

## Лекция 8. Источники энергии и эволюция звёзд

### Формирование звёзд

Довольно долго было непонятно, в каких облаках формируются звёзды. Но в середине 20 века всё-таки начали находить плотные облака. Первым их описал Б. Бок, поэтому мы называем их **глобулами Бока** (рис. 8.1). Хотя открывать их начали раньше.

Э. Барнард получил великолепные фотографии Млечного пути, на которых было видно много тёмных туманностей. А Бок уже их пересчитал. С тех пор мы поняли, что **маленькие непрозрачные облака самые холодные**.

На рис. 8.1 представлены шесть снимков одной и той же глобулы. Её размер от 1 до 10 пк, то есть она ненамного больше Солнечной системы. В оптике (первый снимок) она непрозрачная, при переходе к более **длинным волнам** становится всё более **прозрачной**. В этом особенность глобул.

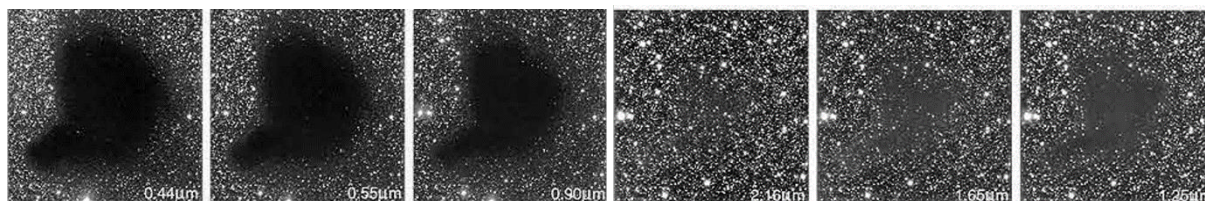


Рис. 8.1. Газопылевое облако Barnard (B 68) в разных диапазонах излучения

Такое облако можно нагреть светом звезды, которая находится рядом с ним. Рядом есть горячие звёзды, но их оптическое, а тем более ультрафиолетовое излучение будет поглощено по краям облака, дальше его пылинки не пропустят. В инфракрасном диапазоне облако прозрачно, значит, оно само может охлаждаться. Там есть пылинки, молекулы, которые светят в инфракрасном диапазоне. Значит, такое облако **охлаждается очень эффективно**. В некоторых облаках температура 3–5 К, а иногда даже ниже, что парадоксально, ведь вся Вселенная наполнена реликтовым излучением с температурой 3 К. Жить в термостате и быть холоднее, чем сам термостат, можно, если снаружи энергия входит с трудом, а изнутри выходит легко.

Молекулярные облака состоят из **водорода (молекулярного)** и **гелия**, но найти их там очень трудно. При низкой температуре гелий очень трудно возбудить, а водород в виде молекул. Атомарный водород излучать может, а любая симметричная молекула этого почти не делает.

**Молекула излучает** либо когда её части колеблются (колебательные уровни энергии), либо когда она вращается, а и то, и другое у молекулы, состоящей из двух одинаковых половинок, не приводит к смещению электрического заряда, он просто остаётся в центре масс. А нам надо, чтобы заряд ходил туда-сюда, как переменный ток в антенне радиопередатчика, где идёт электромагнитная волна.



Поэтому мы изучаем плотные холодные облака по **излучению других молекул**. Например, у молекулы **СО** два разных атома, поэтому если её ударить другой молекулой, она начинает колебаться, и заряд перемещается.

На рис. 8.2а мы видим **оптический снимок Млечного пути**. Там, где на фотографии тёмные места, на карте сверху светит молекула СО. Хотя С и О – сравнительно редкие химические элементы по сравнению с водородом, мы поняли, что где находятся они, там же и водород. Они служат индикаторами холодного газа.

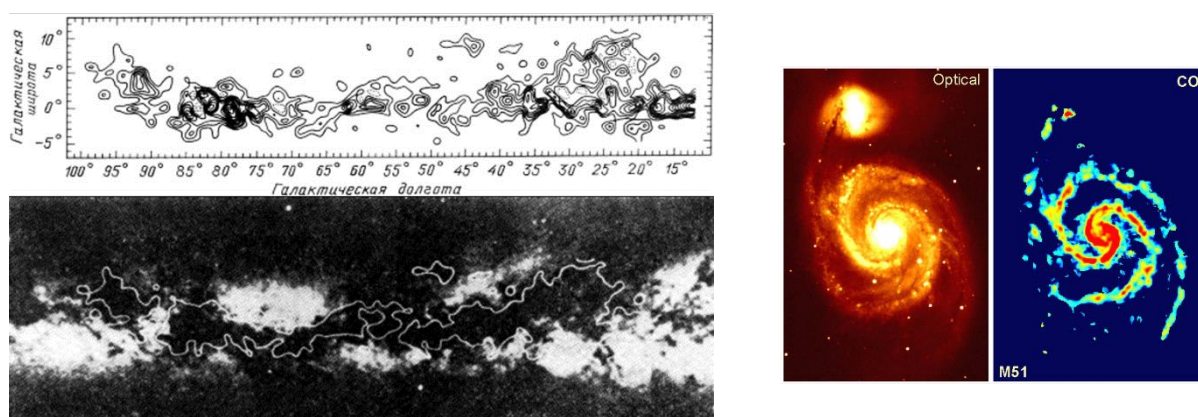


Рис. 8.2. а) оптический снимок Млечного пути, б) галактика M51 в оптическом и СО диапазоне

На рис. 8.2б слева показан **оптический снимок галактики M51**, а справа СО. На первый взгляд, результат странный: в оптике светят в основном горячие звёзды, СО – это очень холодный газ молекулярного состава. Казалось бы, изображения должны быть обратные, но это не так. Из холодного газа рождаются звёзды, и самые массивные, горячие и яркие тут же себя проявляют.

На фотографии ещё видно тёмные холодные прожилки газа вокруг центра, но уже рядом с ними родившиеся из этого газа звёзды начинают его рядом разогревать, а также светят сами.

На рис. 8.3а представлено типичное **строение крупных молекулярных облаков**. Выяснилось, что основная доля межзвёздного вещества сосредоточена в довольно небольшом количестве массивных плотных облаков, которые мы называем **гигантские молекулярные облака**. Их характерная масса порядка 100 тыс. масс Солнца. В нашей Галактике почти нет таких индивидуальных объектов. Есть звёздные **шаровые скопления**, но их тоже в Галактике всего 150–200, а таких молекулярных облаков несколько тысяч. Это самые крупные индивидуальные массы, они перемешивают диск Галактики своей гравитацией.

Такие облака устроены **иерархически**, то есть существует огромное молекулярное облако, в нём сгустки, в них ещё более плотные области, и уже у них одна джинсовская масса Солнца. Из них формируются индивидуальные звёзды, возможно,

массивные звёзды из сгустков. А сто масс Джинса – это уже небольшое звёздное скопление.

	МО	Сгустки	Беззвездные ядра
Масса, $M_{\odot}$	$6 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^6$	100	1-10
Размер, пк	20-100	0,2-4	0,1-0,4
Концентрация, $\text{см}^{-3}$	100-300	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$
Температура, К	15-40	7-15	10
Магнитное поле, мкГс	1-10	3-30	10-50
Ширина линий, $\text{км с}^{-1}$	6-15	0,5-4	0,2-0,4
Время сжатия $t_{\text{ff}}$ , лет	$3 \cdot 10^6$	$10^6$	$5 \cdot 10^5$
Масса Джинса, $M_{\odot}$	100	10	1

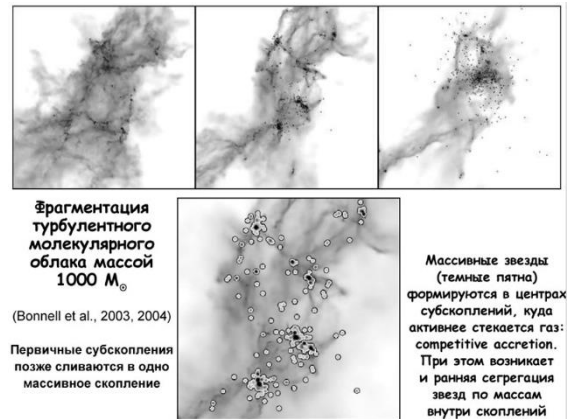


Рис. 8.3. а) иерархия и свойства молекулярных облаков, б) модель фрагментации молекулярного облака

До сих пор мы не можем увидеть это в динамике. Облако живёт долго, иерархия складывается за миллионы лет. Но компьютерная **3D модель** показывает, как сначала почти однородное **облако распадается** на крупные образования, те на более мелкие и т. д. (рис. 8.3б). Данная модель неплохо соответствует наблюдениям.

Иногда удаётся заглянуть в облако и увидеть **звёзды в процессе рождения**. На рис. 8.4а мы видим непрозрачное молекулярное облако, в нём много холодной пыли, отсюда свет не выходит. Но рядом горячие звёзды его нагревают, и наиболее разреженные части быстро поддаются этому нагреву, в них газ течёт. А плотные части как бы выныривают из этого окружения, и некоторое время сохраняются. И на концах таких уплотнений мы видим новорождённые звёзды.

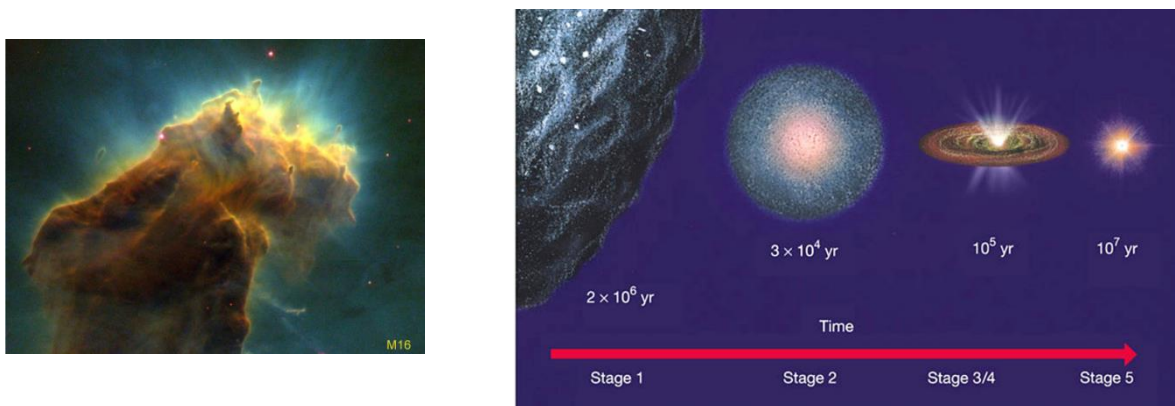


Рис. 8.4. а) звёзды в облаке в процессе рождения, б) этапы формирования звезды

Постепенно звёзды расправляют, переносят в горячее состояние этот газ, и отсюда **появляются звёзды**. Как это происходит, тоже понятно (рис. 8.4б). Сначала появляется уплотнение, потом протозвезда – достаточно оформившийся непрозрачный для света фрагмент, дальше молодая звезда. На неё с периферии продолжает падать газ. Было начальное вращение, поэтому, сжимаясь, газ превращается в диск. Центробежная сила

останавливает сжатие поперёк оси вращения. В конце концов появляется молодая звезда, а из диска формируются планеты.

Обычно поведение молодой звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рассела скачкообразное (рис. 8.5). Если бы мы продолжили диаграмму в область более маленьких температур до нуля кельвинов, где холодное облако, там зарождающаяся протозвезда ещё прозрачная, и оттуда легко выходит излучение.

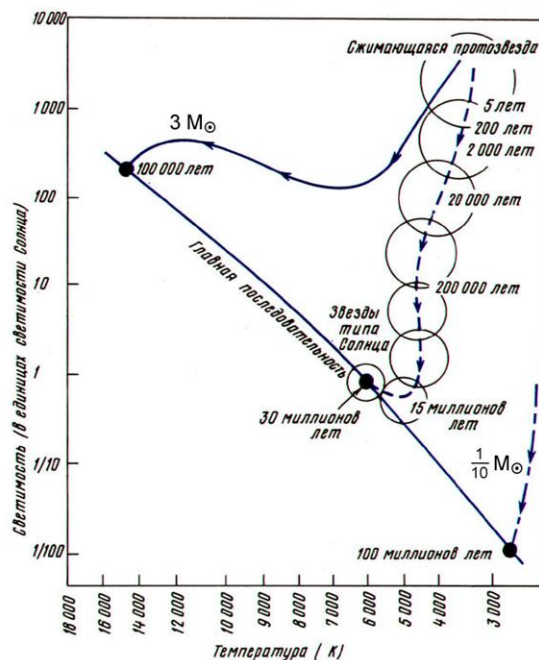


Рис. 8.5. Поведение молодой звезды на диаграмме Герцшпрунга-Рассела

Это облако температурой 1–1,5 тыс. К резко становится ярким источником инфракрасных лучей, поднимается в правый верхний угол диаграммы. Дальше звезда становится непрозрачной, сжимается, её светимость падает. В какой-то момент в её ядре начинаются термоядерные реакции, и она уже занимает место на главной последовательности.

Интересно, что есть эпоха формирования молодой звезды, когда она активно **избавляется от излишков вещества** (рис. 8.6а, с). Сама звезда уже оформилась, она стала горячим источником, а газ продолжает на неё падать. Давление её света, мощного звёздного ветра сопротивляется притоку. Нагретый газ не может протиснуться вдоль диска, он уходит по оси вращения, где пустота. На некоторое время вокруг молодой звезды видны диск и два джета. Иногда это широкие потоки, а иногда очень узкие.

С 2020 г. с помощью интерферометрической системы ALMA миллиметрового диапазона мы стали видеть эти **диски** (рис. 8.6б), а также оттекающие **потоки** (рис. 8.7а).

Вообще потоки замечали давно, только не понимали их происхождение. В середине 60-х годов астрономы Г. Аро и Дж. Хербиг составили каталог ярких плотных облаков и иногда видели струи.

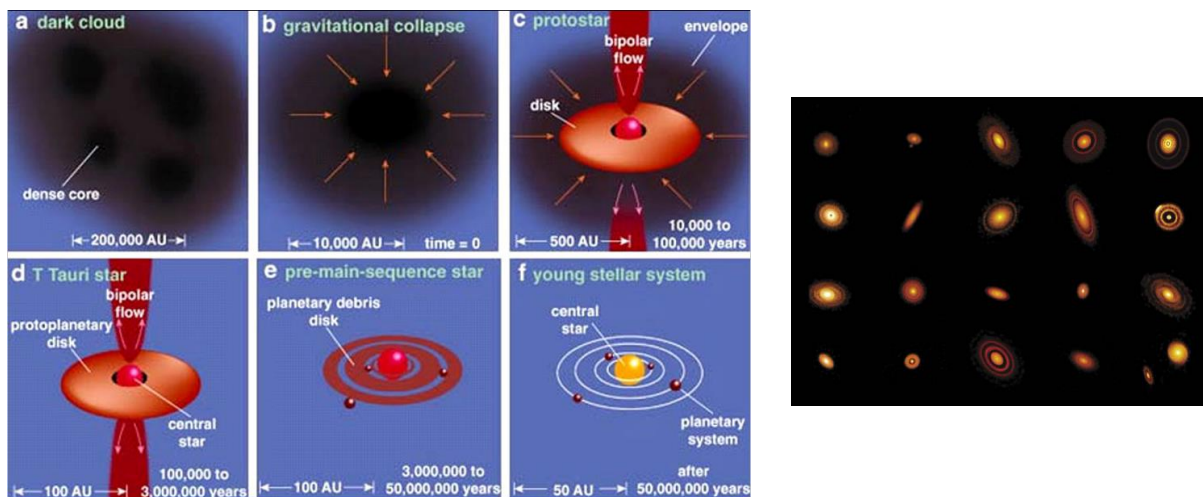


Рис. 8.6. а) этапы формирования звезды, б) протопланетные диски, ALMA 2020

Звезда формируется, нагревает газ, он начинает расширяться и, скорее всего, подхватывает и **нагревает** отдельные **уплотнения**, и мы их видим (рис. 8.7б). Спектральный анализ показал, что одна струя, как правило, летит на нас, а другая от нас. По смещению спектральных линий было очевидно, что это расширяющийся поток. Правый график внизу – смещение в красную сторону (скорость от нас), левый – к нам, в середине среднее положение линий.

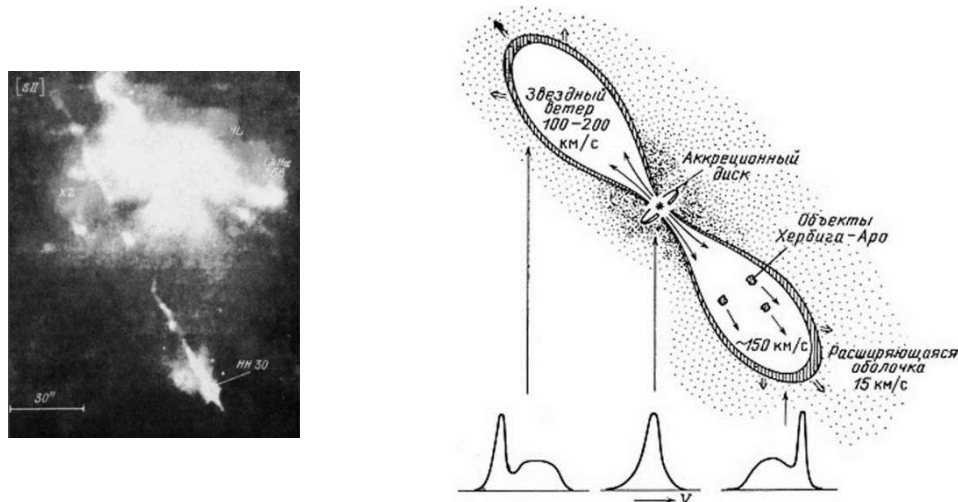


Рис. 8.7. а) потоки газа, б) распространение потоков нагретого газа

На рис. 8.8а видно, что в облаке примерно в середине по ширине формируется звезда. Мы видим один из джетов, который вылетел из облака, дальше сформировалась **ударная волна**, то есть газ, выброшенный звездой, наткнулся на разреженный газ в звёздном пространстве. Второй поток тоже должен присутствовать, потому что движение должно быть уравновешено, он немного виден с другой стороны.

Физический механизм ускорения джетов всё ещё обсуждается. Даже глядя на фотографии, можно сказать, что горячий газ не просто так устремился туда, куда мог улететь. Во-первых, этот поток очень **хорошо сжат**, угол раскрытия иногда 1–1,5 градуса

(рис. 8.8б). Например, при старте ракет струя из реактивного двигателя быстро расширяется, там 15–20 градусов.



Рис. 8.8. а) два джета и ударные волны, б) спиральная структура джета

Также просматривается **спиральная структура**. Возникает предположение, что это механизм типа **Архимедова винта**. Но для него должна быть жёсткая структура, а откуда ей взяться в горячем газе? Только из магнитного поля. Создаётся впечатление, что не только сама звезда, но и аккреционный диск вокруг неё тоже участвует в этом разгоне. Внутренняя часть диска вращается быстро, наружная немного медленнее (закон Кеплера), магнитное поле, вмороженное в диск, закручивается винтом. И это ускоряет движение разреженного горячего газа.

Если фотографировать **туманность Ориона** в инфракрасных лучах (рис. 8.9а), можно проникнуть внутрь и увидеть не только сформировавшиеся звёзды (4 звезды класса О в центре, которые разогревают туманность ультрафиолетовым светом), но и область вокруг них, где звёзды только формируются. В оптическом диапазоне там ничего не видно, только отток уже нагретого ими газа.

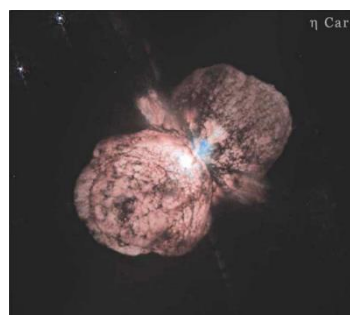


Рис. 8.9. а) центр туманности Ориона в инфракрасном диапазоне, б) звезда  $\eta$  Car

В таком котле звездообразования много газа, уже есть молодые звёзды, и там уже звёзды начинают **взрываться**. На рис. 8.9б видно, что массивная двойная звезда  $\eta$  Car работает как сверхновая: от неё с большой скоростью уходят большие порции газа.

Группа молодых звёзд с помощью света и выбросов горячего газа быстро **освобождается от остатков протозвёздного газа**, изгоняя его на периферию (рис. 8.10а). А там много другого газа, оставшегося от холодного облака. Они друг друга сжимают, получается более-менее **сферическая оболочка**, которая расширяется и освобождает область формирования звёзд от довольно большой массы. Звёзды составляют всего 5–10% массы.

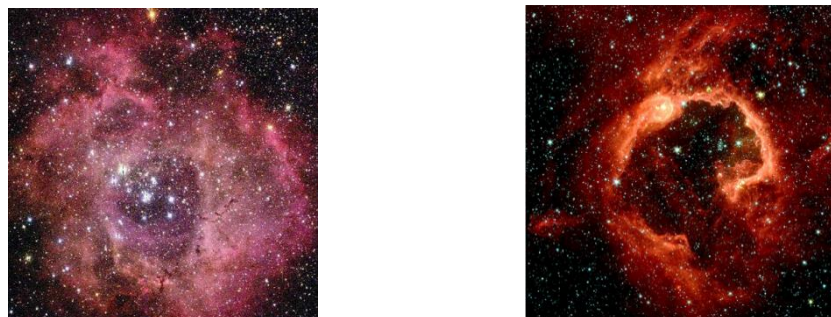


Рис. 8.10. а) изгнание газа на периферию в Rosette nebula, б) разлёт молодых звёзд

Раньше газ формировал гравитационную потенциальную яму, откуда молодые звёзды не могли выйти, а теперь он стремительно покидает эту область, и молодые звёзды оказываются несвязанными гравитацией (рис. 8.10б), потому что они слабо притягиваются друг к другу. Поэтому они с теми скоростями, которые у них были (10–15 км/с) **улетают друг от друга**.

Через некоторое время некоторое количество медленно движущихся звёзд ещё может остаться в связанном состоянии и жить как молодое звёздное скопление. Но большая часть разлетается, и это называют **звёздными ассоциациями** (рис. 8.11а). В созвездии Орион и даже в соседнем созвездии можно найти звёзды, которые движутся точно радиально от места формирования. Звёздные ассоциации быстро рассеиваются. Детально исследовал этот процесс В. А. Амбарцумян.



Рис. 8.11. а) звёздные ассоциации, б) шаровое звёздное скопление

Дальше звёзды, оставшиеся в виде звёздного скопления, тоже разлетаются. Конечно, если это **шаровое звёздное скопление** (рис. 8.11б), то гравитация там мощная, и оттуда вылететь нелегко. А если звёзд несколько десятков или сотен, то их хаотическое движение довольно быстро приводит к тому, что то одна, то другая покидают скопление.

Обычно возраст звёздных скоплений, которые рождаются в нашу эпоху, не больше 10 млн лет. Но возраст шаровых скоплений – миллиарды лет, и мы не всегда понимаем, когда именно они родились и в какой обстановке – до Галактики, внутри неё или в процессе её формирования.

Говоря о формировании звёзд, надо понять, как **формируются двойные**. Есть несколько вариантов. На рис. 8.12а представлен не очень популярный, но хорошо

понятный: в результате **тройного сближения**. Были три случайные звезды, они встретились в одной области пространства, в итоге две образовали связанную систему, а третья унесла избыток энергии.

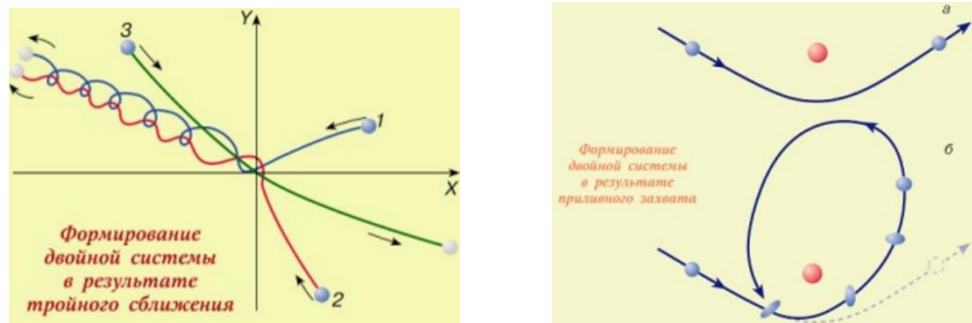


Рис. 8.12. а) формирование двойной системы в результате тройного сближения, б) формирование двойной системы в результате приливного эффекта

На компьютере мы это моделируем, но выясняется, что при случайных вариантах положения и скоростей звёзд такое получается очень редко. Надо, чтобы они одновременно очень тесно сблизились.

Более популярный способ – **прилив** (рис. 8.12б). Если считать звёзды недеформируемыми шариками, то, встретившись, они разлетятся. А если вспомнить, что они газовые тела, с учётом прилива получается, что часть энергии идёт на деформацию, скорость движения снижается, звезда выходит на связанную орбиту.

Но остаются вопросы, как формируются **более сложные системы** – тройные, пяти, шестикратные (рис. 8.13а – система Кастор). Здесь уже нельзя дать объяснение случайным сближением, тем более видно, что они **иерархически устроены**.

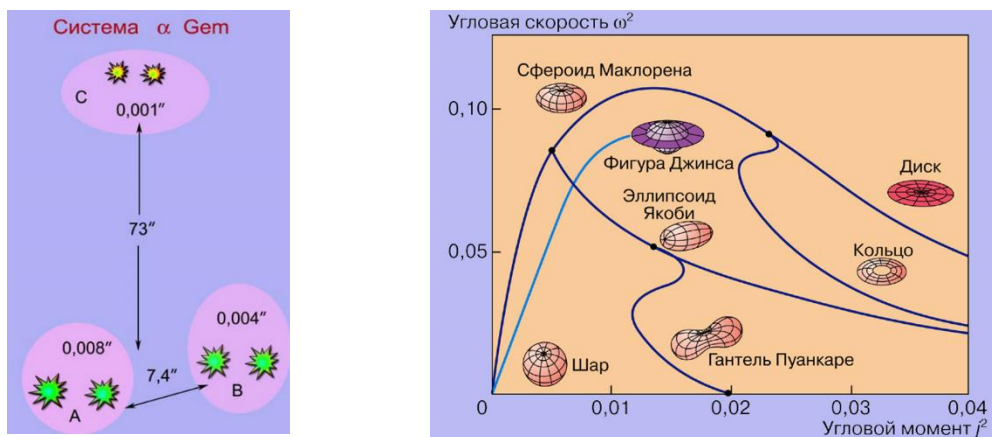


Рис. 8.13. а) 6-кратная система Кастор, б) теория сжатия однородных тел

А и В – тесные пары, они друг от друга гораздо дальше, чем компоненты внутри, значит, воспринимают друг друга как отдельные точечные массы и будут вокруг общего центра вращаться и несильно изменять движение внутри каждой двойной. Пара С тоже тесная, она гораздо дальше. Как раз иерархия расстояний позволяет такой системе долго жить, но как она образовалась, пока непонятно.

На рис. 8.13б показана теория, которую математики 17 и 18 вв. продвигали, думая о том, как рождаются спутники у планет, двойные звёзды и т. д. Была хорошо разработанная **теория сжатия однородных тел**, или жидких тел, потому что жидкость несжимаема и практически однородна.

Представим себе, что есть газовое тело, оно сохраняет однородность, и у него есть медленное начальное вращение. Сначала оно **шар**, но по мере сжатия оно ускоряется (момент импульса сохраняется, угловая скорость растёт). При движении по эволюционной линии **последовательность сфероидов Маклорена** настолько сжимается, что расширение в экваториальной области увеличивает его момент инерции, и оно может немного уменьшать свою скорость вращения. Дальше оно снова крутится, сжатие нарастает, и оно превращается в **двумерный диск**.

Такое может произойти, если всё идеально симметрично, но этого практически не бывает. На эволюционной кривой есть две **точки бифуркации**. Сначала посмотрим на правую. Если из центра диска вещество немного сместится к краям (выгодная ситуация, момент инерции немного увеличится, и будет возможность не так быстро вращаться), дальше сжатие будет продолжаться в виде **кольца**.

Некоторые конфигурации молодых звёзд показывают такую кольцевую структуру, наблюдали 7–12 звёзд по кольцу. Потом кольцо распадается на отдельные фрагменты, из него может сформироваться молодое звёздное скопление.

Теперь рассмотрим левую точку бифуркации. Если немного нарушена осевая симметрия сжатого эллипсоида, вещество может отлететь к концам одного диаметра, и дальше сжатие будет происходить в виде **трёхосного эллипсоида** вокруг малой оси. Последующее сжатие в очень вытянутое тело маловероятно, потому что на этой кривой тоже есть точка бифуркации. Если вещество немного отойдёт к концам данного эллипсоида, это будет более устойчивая фигура – **гантель Пуанкаре**.

Когда её рассчитали, космогонисты подумали, что это та эволюционная последовательность, когда получается два шарика вместо одного: двойная звезда или планета со спутником. Такое действительно может быть, численные расчёты в **гидродинамической трёхмерной модели** А. Босса (рис. 8.14) показали, что вещество делится пополам, потом отдельные фрагменты могут ещё разделиться пополам, и в итоге перед нами на последней картинке зародыш четырёхкратной звёздной системы.

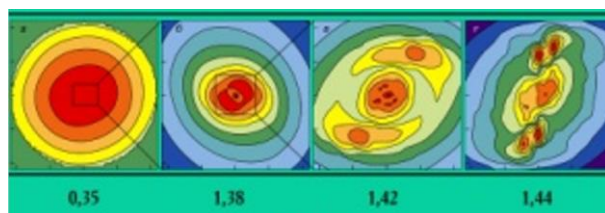


Рис. 8.14. Модель коллапса и фрагментации вращающегося межзвёздного облака

Так что **общий круговорот** мы поняли (рис. 8.15).



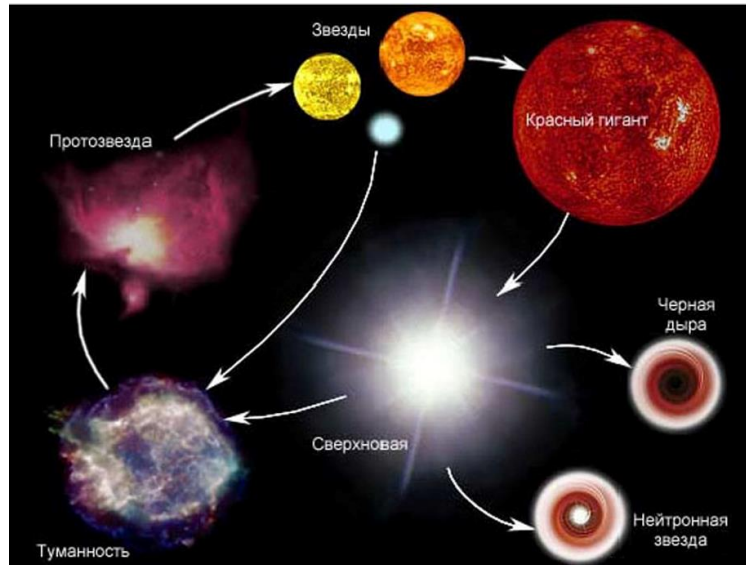
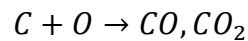


Рис. 8.15. Общий круговорот эволюции звёзд

### Источники энергии звёзд

Первым исторически обсуждался **химический источник энергии**. Он понятный, но надо посмотреть, насколько эффективный. Возьмём чистый углерод и сожжём его в кислороде, получим соединения:



Теплотворная способность сгорания любого углерода в кислороде:  $Q = 2 \times 10^7$  Дж/кг. Сделаем всё Солнце из угля и кислорода и будем их понемногу друг в друге объединять.

Массу Солнца мы знаем:

$$M_{\text{Сол}} = 2 \times 10^{33} \text{ г} = 2 \times 10^{30} \text{ кг}$$

мощность излучения, то есть светимость Солнца, тоже:

$$L_{\text{Сол}} = 2 \times 10^{33} \frac{\text{эрг}}{\text{с}} = 2 \times 10^{26} \text{ Вт}$$

Умножаем массу на теплотворную способность, получаем полный запас химической энергии в звезде. Делим его на скорость её расходования, переводим в года:

$$t = \frac{M_{\text{Сол}} Q}{L_{\text{Сол}}} = \frac{2 \times 10^{30} \cdot 2 \times 10^7}{4 \times 10^{26} \cdot 3 \times 10^7} = 3 \times 10^3 \text{ лет}$$

Получаем, что Солнце будет светить всего **несколько тысячелетий**.

В 19 в. геологи уже хорошо оценивали, например, скорость накопления осадков на дне водоёма, и понимали, что Земле, по крайней мере, уже **миллионы лет**. Значит, и Солнцу не меньше.

Физики поняли, что вокруг Солнца летает вещество в виде метеоритов, комет, астероидов, пыли и т. д., мы его наблюдаем в виде зодиакального света (рис. 8.16а).

Время от времени они падают на Солнце с большой скоростью, ударяются о него, их кинетическая энергия выделяется в виде тепла, и получается **гравитационный источник энергии**.



Рис. 8.16. а) зодиакальный свет, б) гипотеза сжатия Солнца (сер. 19 в.)

Надо заметить, что гравитационные источники часто работают в астрономии: и при сжатии облаков, и при сжатии молодых и старых звёзд. Но поддержать светимость звёзд в течение миллионов лет он не сможет, комет и астероидов слишком мало для этого.

Тогда Майер, Гельмгольц и Томсон сказали, что **Солнце может** падать само на себя, то есть **сжиматься** (рис. 8.16б). Мы знаем, какая энергия выделяется при падении одной массы самой на себя (при сжатии):

$$U = \frac{GM^2}{R}$$

Также при сжатии газовое тело будет нагреваться, значит, половина энергии пойдёт на нагрев, а вторая половина будет вынуждена излучиться по теореме о вириале.

Делим запас гравитационной энергии Солнца на его светимость и пополам, получаем время жизни 30 млн лет:

$$t = \frac{U}{2L} = 30 \text{ млн лет}$$

10–30 млн лет действительно характерное время сжатия формирующихся звёзд. Тогда для них главным источником энергии является собственное гравитационное поле.

В 20 в. открыли радиоактивность, и возраст Земли, измеренный методами радиоактивного распада, оказался больше. Теперь мы строим модели звёзд и пытаемся объяснить, как они в почти неизменном состоянии могут жить **миллиарды лет**.

Такие **модели** как правило **сферически симметричные**, хотя некоторые быстро вращаются, и **гидростатические** (рис. 8.17а), то есть градиент давления должен поддерживать вес любого элемента звезды и обеспечивать неподвижность. Поддерживают здесь газовое и радиоактивное давления (давление излучения). Оба мы умеем рассчитывать.

На рис. 8.17б показано, как выглядит **гидростатическая модель Солнца**. Здесь 4 главных параметра. От центра к периферии нарастает масса внутри данного радиуса. Интересно, что половина массы Солнца находится в 10% его радиуса, то есть ядро звезды должно быть очень плотным. По шкале плотности тоже видно, что она очень быстро

нарастает к центру и в центре плотность газа, плазмы достигает  $140 - 150 \text{ г/см}^3$ . Температура тоже повышается примерно до 15 млн К. Светимость в единицах полной светимости Солнца набирается в центральных 20% Солнца, то есть тоже в ядре, которое генерирует энергию. Дальше излучение просто просачивается наружу.

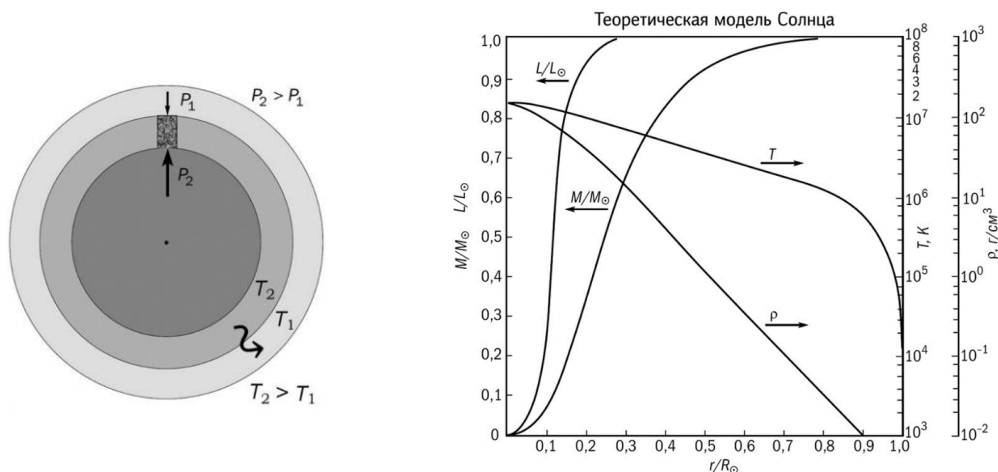


Рис. 8.17. а) гидростатическая модель звезды, б) изменение параметров в гидростатической модели Солнца

После этого объяснялся **источник энергии**. Сначала был открыт **радиоактивный распад тяжёлых элементов**, и он был очень эффективным. По спектрам было ещё неясно, из чего состоят звёзды. Водород там почти не проявлял себя, а линии металлов были видны очень хорошо. Сделали вывод, что звезда состоит из металлов, например, из урана, радия и т. д.

Быстро поняли, что, если звезда будет нагревать себя чисто за счёт радиоактивности, то быстро взорвётся. Тогда стали думать про **синтез из лёгких элементов более тяжёлых**. Расчёты показали, что при слиянии лёгких элементов тоже будет выделяться энергия.

Но было непонятно, как обеспечить это слияние. Водород полностью ионизован, то есть у нас протоны, и чтобы объединить их в ядро гелия или более сложного элемента, их надо сблизить, а они отталкиваются электростатическими силами (рис. 8.18). Значит, если в начале координат один протон, а к нему подлетает другой, он должен преодолеть **потенциальный барьер** электростатического отталкивания. Когда они сблизятся практически до своего размера, их уже не отпустит сильное ядерное взаимодействие. Сблизить их можно, только разогнав за счёт высокой температуры. Чем горячее газ, тем интенсивнее летают частицы, и им надо преодолевать этот барьер.

Расчёты показали, что это возможно, только температура должна быть 100 млрд К. А в недрах Солнца максимум 10–15 млн К. Значит, данная теория к нему неприменима.

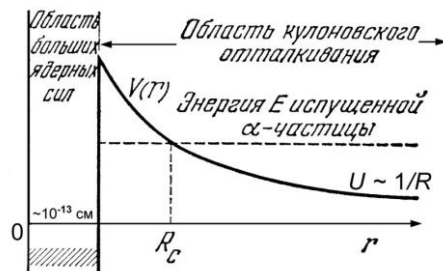


Рис. 8.18. Потенциальная энергия  $\alpha$ -частицы вблизи атомного ядра

А потом оказалось, что такая высокая температура не нужна. В рамках квантовой механики существует возможность, несильно сближая две частицы, заставить их объединиться. Квантовая механика всегда гарантирует такую вероятность, потому что принцип неопределённости гласит, что **частица может протунеллировать**, не преодолевая электростатический потенциальный барьер. Такая вероятность маленькая, но ненулевая.

Два протона летят, сближаются, и с некоторой вероятностью в этот момент один из **протонов может превратиться в нейтрон** (рис. 8.19). Нейтрон тяжелее протона. При этом ему надо избавиться от положительного заряда, то есть выбросить позитрон. Но если родилась такая лёгкая частица (лептон), то для сохранения лептонного заряда должна родиться ещё одна с антилептонным зарядом, например, нейтрино.

Значит, протон должен быть очень быстрым, чтобы энергия движения  $E = mc^2$  превратилась в массу. Если следить за одним протоном в недрах Солнца, то он имеет шанс примерно 1 раз в 10 млрд лет превратиться в нейтрон. Это хорошо, потому что тогда звезда может порядка 10 млрд лет осуществлять эту реакцию в своих недрах.

В результате данной реакции появляется **ядро дейтерия** – тяжёлый изотоп водорода с зарядом 1 и массой 2. Следующий протон, подлетая, может присоединиться, ничего не выкидывая. Получится **лёгкий изотоп гелия** – два протона и один нейтрон.

Дальше два лёгких изотопа гелия встречаются и могут связаться в более компактную массивную частицу. Но в ней будет избыток протонов, электростатика хочет от них избавиться, ядерные силы не могут удержать такую систему. Два протона улетают, и остаётся симметричная по всем зарядам частица из двух протонов и двух нейтронов, в которой очень хорошо работают ядерные силы. Это **ядро нормального гелия** ( ${}^4\text{He}$ ,  $\alpha$ -частица). Такая частица очень плотно сжата, у неё большая энергия связи, которая выплёскивается в **два быстро улетевших протона**. Те протоны отдадут свою кинетическую энергию, сталкиваясь с соседними атомами.

Отметим пару нюансов. Неправильно говорить, что в недрах Солнца происходит термоядерный синтез. Надо говорить, что происходит **синтез гелия из водорода**. Также неправильно называть это протон-протонным циклом. Это движение в одном направлении, ничего не восстанавливается, это **p-p chain**.



Рис. 8.19. Этапы синтеза гелия из водорода

А на рис. 8.20а приведён пример цикла (**CNO-цикл**). Он происходит на Солнце, но играет незначительную роль, потому что для него нужна большая температура. Если есть ядра, например, углерода, который участвует в данной реакции как катализатор, с зарядом +6, только очень высокая температура может позволить водороду с зарядом +1 приблизиться к такому ядру. У Солнца уже достаточная температура, чтобы такое иногда происходило.

Дальше в цикле идёт превращение в другие изотопы, в этом участвуют другие атомы водорода, потом тяжёлое ядро азота распадается на углерод и гелий. Выбрасывается альфа-частица, а углерод в цикле восстанавливается. В любой каталитической реакции катализатор способствует реакции других химических элементов, изменяется, но возвращается в исходную форму.

Дальше тоже может происходить процесс усложнения (рис. 8.20б). Например, три альфа-частицы могут слиться в **ядро углерода**, а потом четвёртая даёт **кислород** и т. д. Но встреча трёх – редкий вариант, два встречаются гораздо чаще. Они могут слиться в **ядро бериллия**, но оно неустойчивое, очень быстро распадается. А если к нему почти сразу же подлетит третья альфа-частица, тогда получится очень устойчивый элемент. Для этого надо, чтобы было **возбуждённое состояние ядра атома углерода**, чтобы подлёт частицы не требовал сброса излишка энергии, а углерод родился бы в возбуждённом состоянии.

Без этой реакции цепочка термоядерного синтеза дальше не происходит. Астрофизик Ф. Хойл сказал, что, если вся живая материя создана на основе углерода, значит, он обязан был получиться, то есть эта реакция обязана была произойти. Значит,

ядро углерода обязано иметь возбуждённое состояние. Хойл даже теоретически вычислил, какое. В итоге физики-ядерщики его нашли.

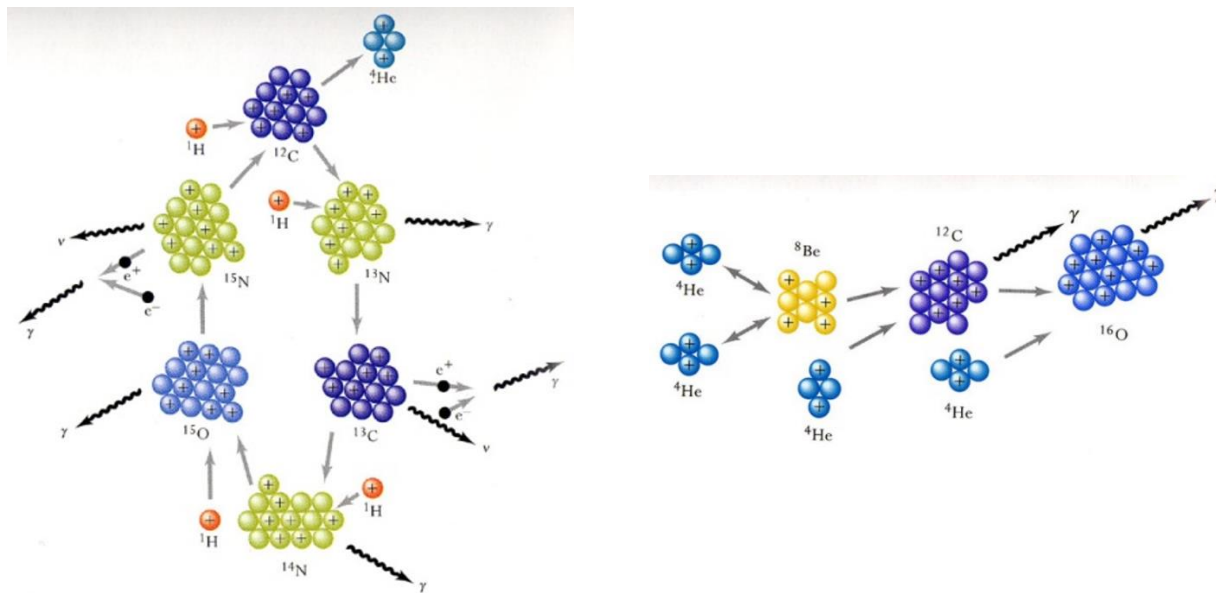


Рис. 8.20. Углеродно-азотный цикл, б) 3α-реакция

На рис. 8.21 показано, какая температура должна быть в недрах звёзд для протекания всё более и более сложных термоядерных реакций. Мы их условно называем горением. Температура должна быть всё более высокой, потому что сливаются ядра с большим электрическим зарядом, и их трудно сблизить.

Процесс	Топливо	Продукты реакции	Примерная температура
Горение водорода	Водород	Гелий	$(1-3) \times 10^7$
Горение гелия	Гелий	Углерод, кислород	$2 \times 10^8$
Горение углерода	Углерод	Кислород, неон, натрий, магний	$8 \times 10^8$
Горение неона	Неон	Кислород, магний	$1,5 \times 10^9$
Горение кислорода	Кислород	От магния до серы	$2 \times 10^9$
Горение кремния	От магния до серы	Элементы, близкие к железу	$3 \times 10^9$

Рис. 8.21. Стадии генерации ядерной энергии

Модель массивных звёзд показывает, что в их ядрах как раз миллиарды кельвинов, и там может формироваться всё вплоть до элементов группы железа. А вот дальше проблема. У железа и близких к нему элементов, например, у никеля, у ядра наибольшая энергия связи. То есть, когда происходит переход от магния и серы к железу, энергия выделяется, ядро звезды нагревается. А чтобы из двух атомов железа собрать

атом более тяжёлого элемента, надо потратить энергию. Но тогда бы охладилось ядро звезды, да и вообще процесс бы не пошёл, потому что сам себя поддерживать не может.

Надо было **проверить**, происходит ли в недрах звёзд на самом деле получившаяся на бумаге **протон-протонная реакция**. В третьей реакции вообще ничего не рождается, как были частицы внутри звезды, так там и остались (рис. 8.22а). Во второй появляется гамма-квант, но ему не так просто выйти из звезды. А в первой рождается позитрон, находит рядом электрон, происходит аннигиляция, тоже появляются гамма-кванты. Однако ещё рождается **нейтрино**, которое плохо с чем-то взаимодействует. Из-за необходимости рождения нейтрино первая реакция очень редкая, ей управляют слабые ядерные взаимодействия, она протекает медленно. Поэтому Солнце светит долго, но и поймать нейтрино нелегко.

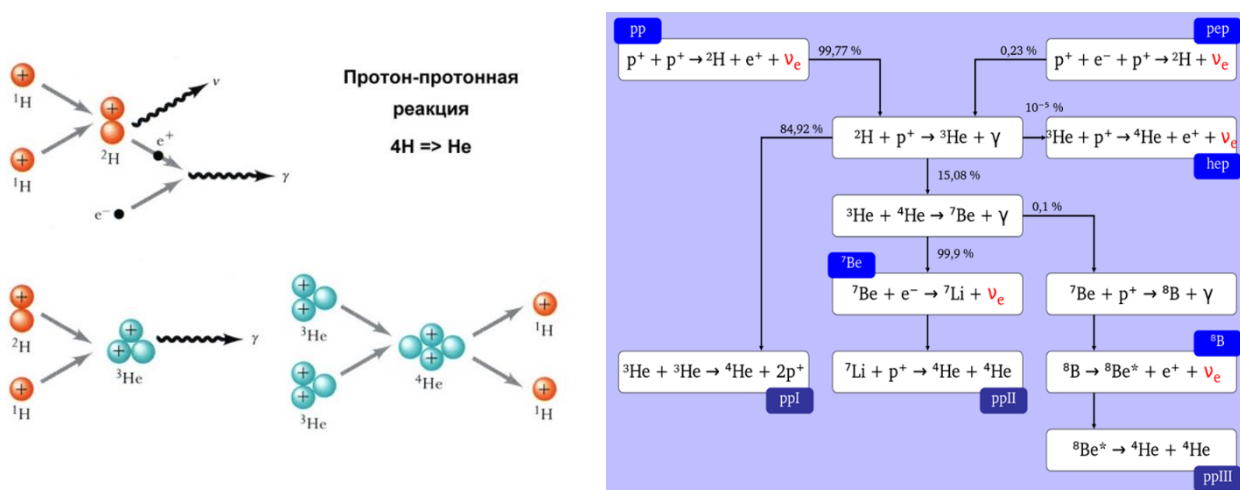


Рис. 8.22. а) протон-протонная реакция и рождающиеся в ней частицы, б) реакции в недрах Солнца

На рис. 8.22б продемонстрировано, что на самом деле происходит в недрах Солнца. До этого мы рассматривали самый популярный и важный процесс – самая левая цепочка питает энергией Солнце. Но есть ещё и **побочные маловероятные реакции**, где рождаются бор, бериллий, литий. И там тоже иногда генерируется нейтрино. Все они электронные, потому что рождаются с частицей с позитроном или электроном, но у них разная энергия. Нейтрино из первой реакции имеют небольшую энергию, и поймать их очень трудно. А в редких реакциях рождаются нейтрино высокой энергии, и, хотя сами эти реакции маловероятны, но именно эти нейтрино легче поймать.

Стали делать разные **нейтринные детекторы** на Земле (рис. 8.23). Сначала хлорные, потом хлорные и водяные. На графике показано, реакции с появлением какого вещества дают нейтрино. Ни хлорные, ни водяные детекторы не могли детектировать самое главной нейтрино, рождающееся при слиянии двух протонов. Однако потом, ещё в советское время, сделали галлиевый детектор. Данный металл хорошо поглощает нейтрино низкой энергии (МэВ).

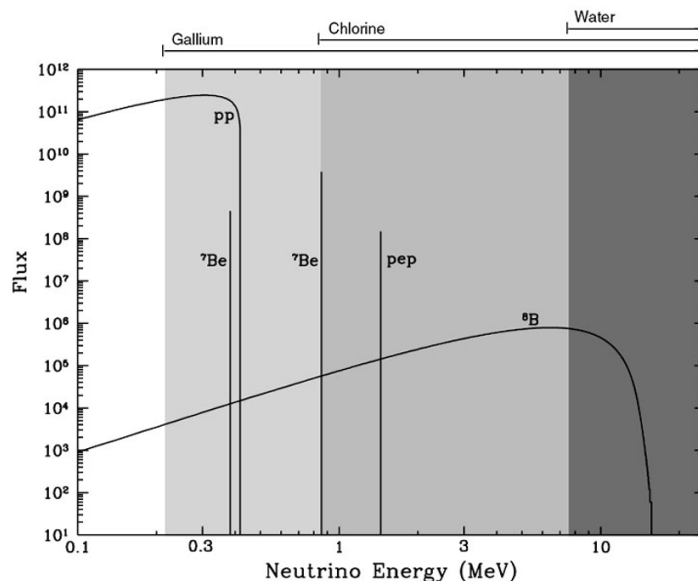


Рис. 8.23. Способность нейтринных детекторов на Земле зарегистрировать нейтрино разной энергии

Первыми, конечно, пытались поймать высокоэнергичные нейтрино, а для этого нужен именно жидкий детектор – **водяной или хлорный** (рис. 8.24а). Но с хлором в чистом виде лучше не работать, поэтому стали использовать **тетрахлорэтилен (C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>)**. Это жидкость, и она менее опасная.

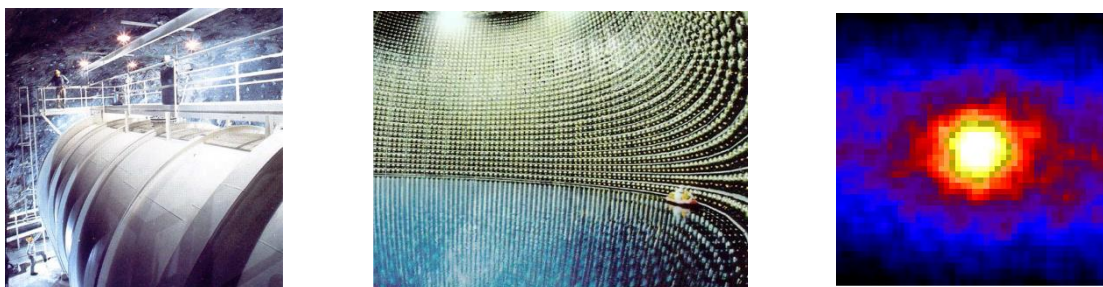


Рис. 8.24. а) Хлорный детектор солнечных нейтрино (Хоутстейк, 1968-96), б) водный детектор Суперкамиоканд, в) изображение Солнца, полученное детектором нейтрино в Суперкамиоканде в 1988 г.

Теорию создал физик Б. Понтекорво. Он объяснил, что реакция с захватом нейтрино атомом и его превращением в аргон довольно вероятная. Если заполнить большую бочку хлоросодержащим веществом, нейтрино может там застрять и превратить несколько атомов хлора в несколько атомов радиоактивного изотопа <sup>36</sup>Ar, который можно легко идентифицировать.

Р. Дэвис впервые в середине 60-х залил в бочку 380 т тетрахлорэтилена, и в неделю там рождалось всего несколько атомов. Бочка располагалась на глубине 1,5 км под землёй, потому что на поверхности космические лучи в огромном количестве, а в толще земли всё, кроме нейтрино, застревает.



Надо было выяснить, откуда прилетают нейтрино. Сделали очень большой **водный детектор «Супер-Камиоканде»** (рис. 8.24б), потому что с ядрами кислорода и водорода нейтрино взаимодействуют не так хорошо, как с хлором. Если нейтрино поглощается в воде, рождается электрон, и он быстро летит туда же, откуда прилетело нейтрино. В воде у него получается сверхсветовая скорость, он возбуждает колебания соседних атомов, возникает черенковское излучение. Оно регистрируется фотоэлектронными умножителями, направление определяется.

В 1998 г. после 1,5 лет наблюдений был создан **нейтринный портрет источника**, который посылает их на Землю (рис. 8.24в). Подтвердилось, что это именно Солнце. Но надо заметить, что диагональ этой картинки 90 градусов, а размер солнечного диска на небе 0,5 градуса. Значит, само Солнце на данной картинке – точка в центре, но центр данной картинке совпадает с направлением на него.

Выяснилось, что от Солнца прилетало в 3 раза меньше нейтрино, чем должно быть в теории. На рис. 8.25 показаны **расхождения теории и эксперимента** на хлорном, водяном, галлиевом детекторах.

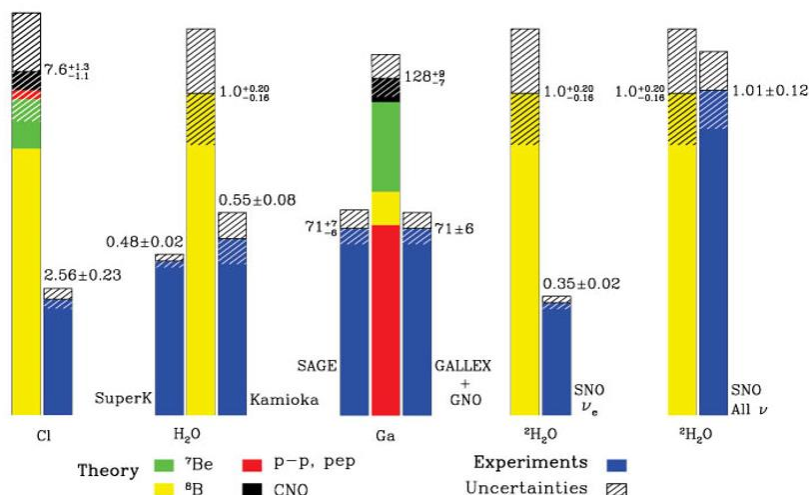


Рис. 8.25. Расхождения теории и эксперимента на разных нейтринных детекторах

Сначала астрофизики пытались переделать **модель Солнца**. Мы видим светимость Солнца, значит, знаем, сколько энергии в нём генерируется. Расчёты показывают, сколько при этом должно родиться нейтрино. Но мы получаем свет с поверхности Солнца, а от ядра до неё кванты движутся до 100 тыс. лет. При этом нейтрино достигают Земли за 8 минут. Предполагали, что в наше время термоядерный синтез в ядре ослаб, и нейтрино рождается меньше, а Солнце высвечивает тот свет, который был сгенерирован давно, когда оно ещё работало мощно. Стали делать модели, но ничего не получалось.

Тогда решили, что мы что-то не понимаем про нейтрино. Существует **несколько типов нейтрино** (рис. 8.26а). Мю- и тау- мезоны похожи на электрон, но их масса больше, и им соответствуют мюонное и тау нейтрино, рождающиеся вместе с этими

частицами. Высказали предположение, что они умеют друг в друга превращаться. Физики сомневались, что такое возможно, потому что нейтрино не имеет массы (на сегодняшний день известно, что она ниже 1 эВ).

Тогда в Канаде сделали **детектор**, в котором 1000 тонн **тяжёлой воды** ( $D_2O$ ) (рис. 8.26б), а с ядром дейтерия могут взаимодействовать все виды нейтрино. Данный детектор показал, что в сумме нейтрино с разными ароматами составляют столько, сколько и должно быть по теории (рис. 8.25, последние 2 столбика).

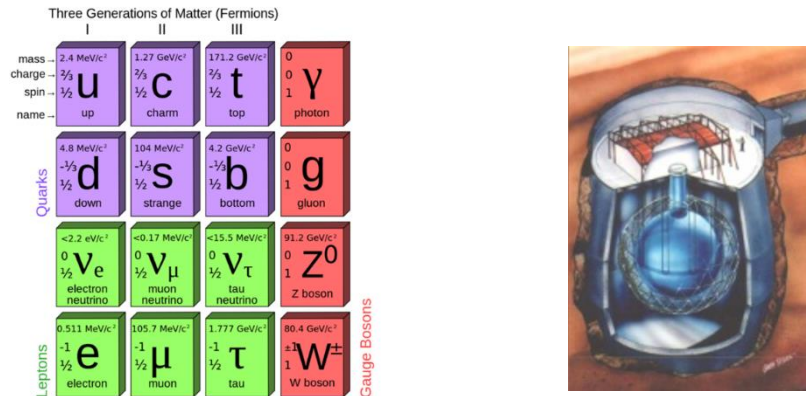


Рис. 8.26. а) типы нейтрино, б) детектор на тяжёлой воде

Значит, в Солнце рождаются электронные нейтрино, а пока они летят к Земле, превращаются друга в друга. Точную теорию этих превращений до сих пор не создали.

На рис. 8.27 показано, как **зависит светимость**, то есть мощность звезды главной последовательности **от её массы**. Чем больше масса, тем больше светимость, причём она растёт с массой очень быстро. Для звезд примерно солнечной массы  $L \sim M^4$ , а для звезд в широком диапазоне масс (0,2–20  $M_{\text{Сол}}$ )  $L \sim M^{3,5}$ .

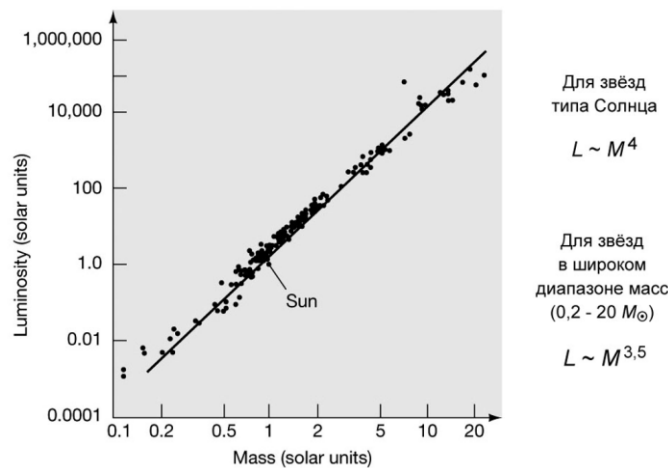


Рис. 8.27. Зависимость светимости звезд главной последовательности от массы

**Чем массивнее звезда**, тем выше температура в её центральной области, интенсивнее протекание ядерных реакций и быстрее сжатие между периодами «смены топлива». А также тем больше её светимость и тем быстрее кончается топливо.

Соответственно, тем короче её жизнь. Время жизни Солнца примерно 12 млрд лет, звёзд с массой в 100 раз больше (а мы знаем даже в 130) – примерно 3 млн лет, а с массой, равной половине солнечной, – 100 млрд лет, что больше возраста Вселенной. А есть звезды, которые в десятки раз легче Солнца. То есть ни одна маленькая звезда ещё не закончила свою эволюцию.

Посмотрим на **эволюцию трёх звезд разной массы** (рис. 8.28). Формирование всегда происходит быстро, облако сжимается за сотни, а то и единицы миллионов лет. Чем массивнее звезда, тем быстрее это происходит. На главной последовательности звёзды живут сравнительно долго (90% времени), а в состоянии гигантов уже значительно меньше. Поэтому **90% звёзд мы видим находящимися на главной последовательности.**

Начальная масса	1 $M_{\odot}$	5 $M_{\odot}$	10 $M_{\odot}$
Формирование	$1 \times 10^8$ лет	$5 \times 10^6$ лет	$6 \times 10^5$ лет
Главная последовательность	$9 \times 10^9$ лет	$6 \times 10^7$ лет	$1 \times 10^7$ лет
Гигант	$1 \times 10^9$ лет	$1 \times 10^7$ лет	$1 \times 10^6$ лет

Рис. 8.28. Продолжительность этапов эволюции звёзд разной массы

На рис. 8.29 мы видим таблицу, где в зависимости от массы звезды показаны её **радиус, светимость, температура поверхности и длительность эволюции.**

Масса, $M_{\odot}$	Радиус, $R_{\odot}$	Светимость, $L_{\odot}$	Температура, К	Спектральный класс	Время жизни, лет
120	15,8	1 800 000	53 300	O3	3 млн
60	10,6	530 000	48 200	O4	4
27	8,5	140 000	38 000	O7	8
16	5,7	16 000	32 000	B0	13
8,3	4,8	2 500	17 000	B3	34
5,4	3,7	750	15 000	B5	80
3,5	2,7	130	12 500	B8	220
2,6	2,3	63	9 500	A0	480
2,2	2,0	40	9 000	A2	770
1,8	1,7	11	8 100	A7	1 400
1,5	1,3	6,3	7 100	F2	2 500
1,2	1,1	2,5	6 100	F8	5 300
1,0	1,00	1,10	5 800	G2	10 млрд
0,85	0,87	0,44	5 300	G8	18
0,78	0,79	0,28	4 830	K2	25
0,58	0,67	0,12	3 900	K8	70
0,47	0,63	0,075	3 670	M0	150
0,33	0,36	0,030	3 400	M2	230
0,2	0,21	0,005	3 200	M4	800

Рис. 8.29. Параметры звёзд главной последовательности

Казалось бы, уменьшая массу звезды, мы можем неограниченно продлевать время её жизни. Однако на самом деле это не так. Звёзды с массой меньше примерно 8% массы Солнца **звёздами вообще не станут**, в их недрах ни на каком этапе сжатия не достигается температура, необходимая для протекания термоядерной реакции слияния протонов

(рис. 8.30а). Если звезда чуть больше этого **предела**, она формируется, попадает на главную последовательность и живёт триллионы лет. А если меньше, то формируется и тут же остывает.

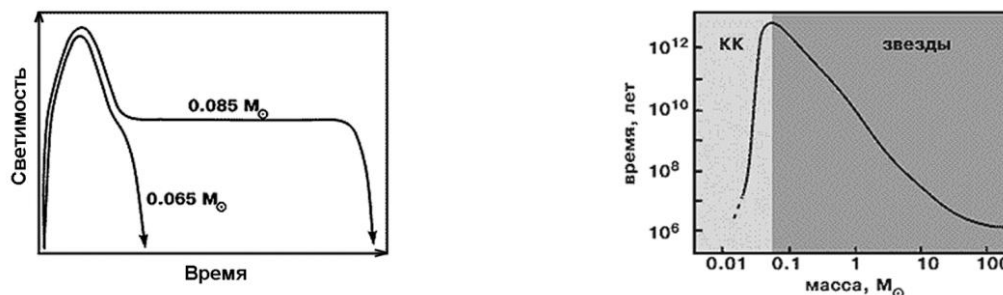


Рис. 8.30. а) эволюция светимости двух протозвёзд, имеющих массы чуть больше и чуть меньше нижнего предела для р-р-реакции, б) время жизни звезды в зависимости от её массы

На рис. 8.30б представлено **время жизни звёзд разной массы и коричневых карликов**.

На рис. 8.31 показано, как происходит **эволюция маломассивных объектов**. Массы всех тел указаны в массах Юпитера, характерных для лёгких звёзд. Планеты просто остывают, в них не существует источников энергии кроме гравитационного. Маломассивные звёзды сжимаются и выходят на стационар.

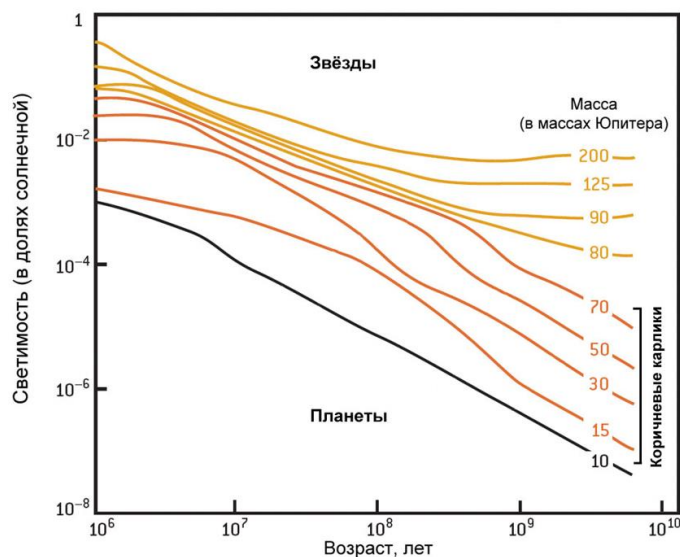


Рис. 8.31. Эволюция маломассивных объектов

А **коричневые карлики** сначала сжимаются, потом сжатие приостанавливается, а дальше опять продолжается. Причина в том, что кроме обычного легкого водорода есть его тяжёлый изотоп дейтерий. Его всего 0,001% от всего водорода, и он легче вступает в термоядерную реакцию. В коричневых карликах всё-таки происходит термоядерная реакция слияния дейтерия и синтез гелия из него. Но дейтерия мало, он быстро сгорает и обеспечивает мало тепла.

На рис. 8.32 показано, как **выглядят коричневые карлики**. Они тоже могут быть разные. На предыдущей диаграмме было видно, что их светимость меняется, значит, температура тоже, мы их видим на разных стадиях остывания.

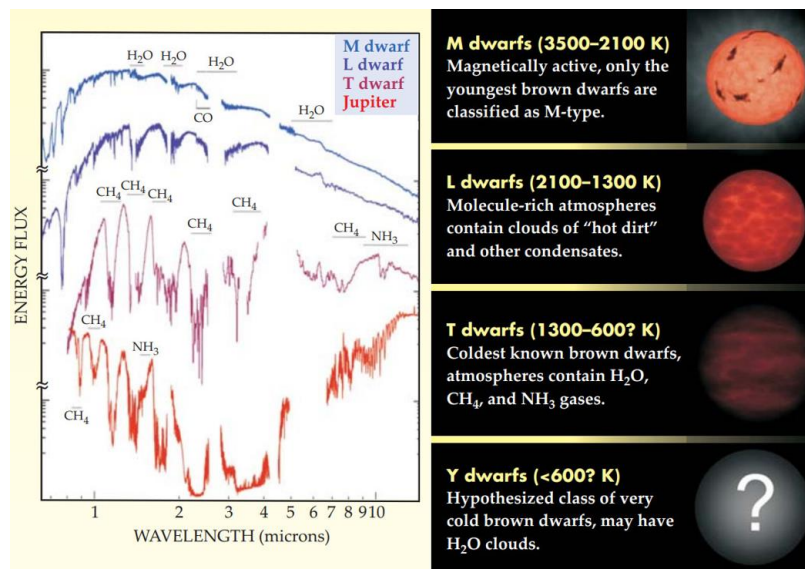


Рис. 8.32. Виды коричневых карликов и их спектры

Есть коричневые карлики, которые имеют **спектральный класс М**. Это довольно горячие звёзды с температурой 2–3 тыс. К, почти как обычные красные карлики. Но такую температуру они имеют только пока очень молодые. Дальше они остывают, у спектральных классов **L** и **T** уже видны в атмосфере молекулы.

Возможно, в ближайшее время будет введён класс **Y** для совсем холодных коричневых карликов, которые уже сложно отличить от планет. Юпитер в период своего формирования тоже был горячим. Он сжимался, и гравитация его сильно нагревала. Это заметно по зависимости плотности спутников Юпитера от их расстояния до него. Самый плотный Ио, самый разреженный Каллисто, потому что Юпитер был горячий и больше нагревал ближние к себе как в маленькой Солнечной системе. Поэтому при такой температуре непонятно, перед нами формирующаяся планета-гигант или остывший коричневый карлик. При такой температуре уже светят одни молекулы.

**Перенос энергии** генерируется в ядре, а ей надо попасть на поверхность звезды, чтобы с неё уйти (рис. 8.33). В ядре температура высокая, а плотность электромагнитной энергии по закону Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени температуры:

$$\vec{F} = \frac{-c}{3\rho k_F} (aT^4)$$

Поэтому электромагнитных квантов (как правило, гамма-квантов) уже достаточно, и они диффундируют, отражаются, поглощаются, но в конце концов стремятся наружу.

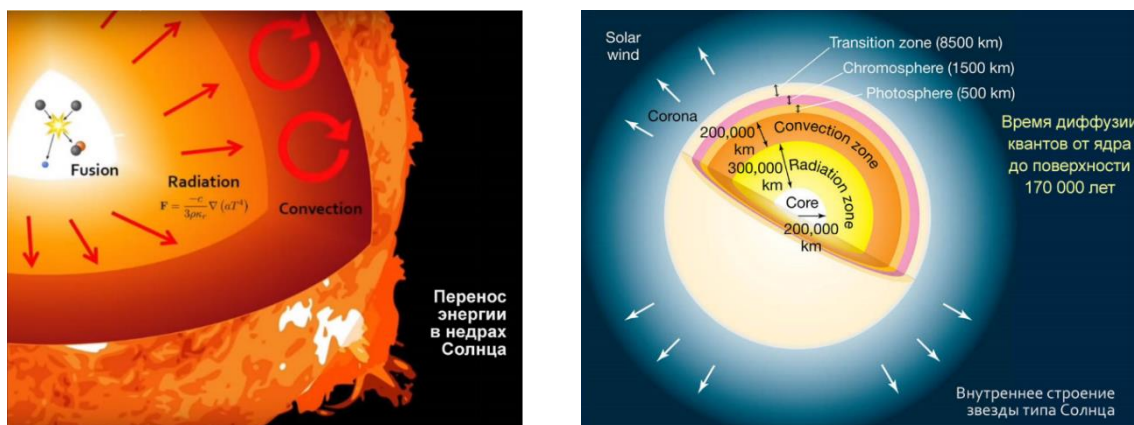


Рис. 8.33. а) перенос энергии в недрах Солнца, б) внутреннее строение звезды типа Солнца

Начиная с определённой границы, поток квантов ослабевает, потому что температура газа быстро падает, и он становится не таким прозрачным. Здесь горячий газ просто всплывает и путём конвекции переносит тепло от горячих внутренних слоёв к холодным внешним. Конвекция происходит симметрично.

То есть у звёзд типа Солнца есть **радиоактивная зона**, где энергию переносит радиация, и **конвективная**, где движение вещества является более эффективным, там просто горячие потоки газа (рис. 8.34а). Дальше поверхность Солнца и уже прозрачные для света слои – корона, термосфера. Оттуда просто улетают кванты.

На рис. 8.34б правильно нарисованная **конвекция**.

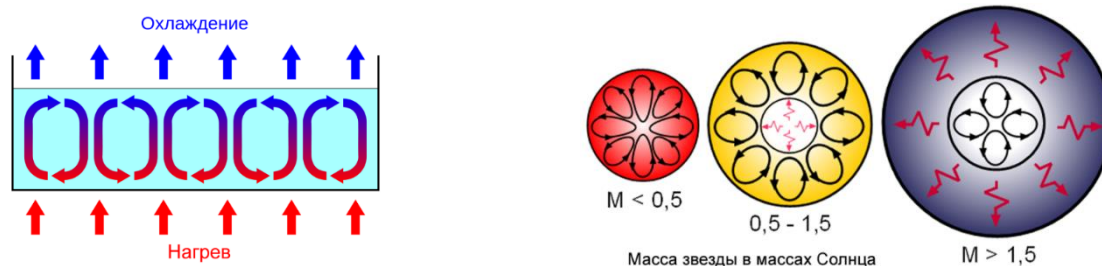


Рис. 8.34. а) формирование конвективных ячеек Бенара, б) перенос энергии в звёздах главной последовательности

Оказывается, в звёздах разной массы эти **два механизма переноса тепла конкурируют**, и в разных областях выигрывает то один, то второй (рис. 8.34б). Когда звёзды маломассивные, холодные, там плотность квантов такая низкая, что радиоактивный перенос не имеет значения. Красные карлики конвективны от ядра до оболочки. На Солнце и подобных ему звёздах по внутренней части энергия переносится квантами, а снаружи конвекцией. А у звёзд очень большой массы кванты не справляются внутри, и там конвективные ядра. А снаружи большая звезда имеет такую высокую температуру, как в ядре Солнца, и там перенос квантами.

Но в целом, именно эти два механизма обеспечивают перенос тепла. Есть ещё третий – **теплопроводность**. В звёздах тоже атомы столкновениями передают друг другу энергию, но это имеет значение в белых карликах, а не в нормальных звёздах.

На рис. 8.35 представлены **звёзды разной массы** вплоть до коричневых карликов и даже планет-гигантов приведена **таблица их размеров, массы, температуры и происходящих в них реакций**. Мы называет звёздами те объекты, где сливается в синтезе обычный водород. На коричневых карликах идёт реакция слияния ядер дейтерия, а на планетах вообще никакие не идут. Поэтому коричневые карлики и не звёзды, и не планеты.

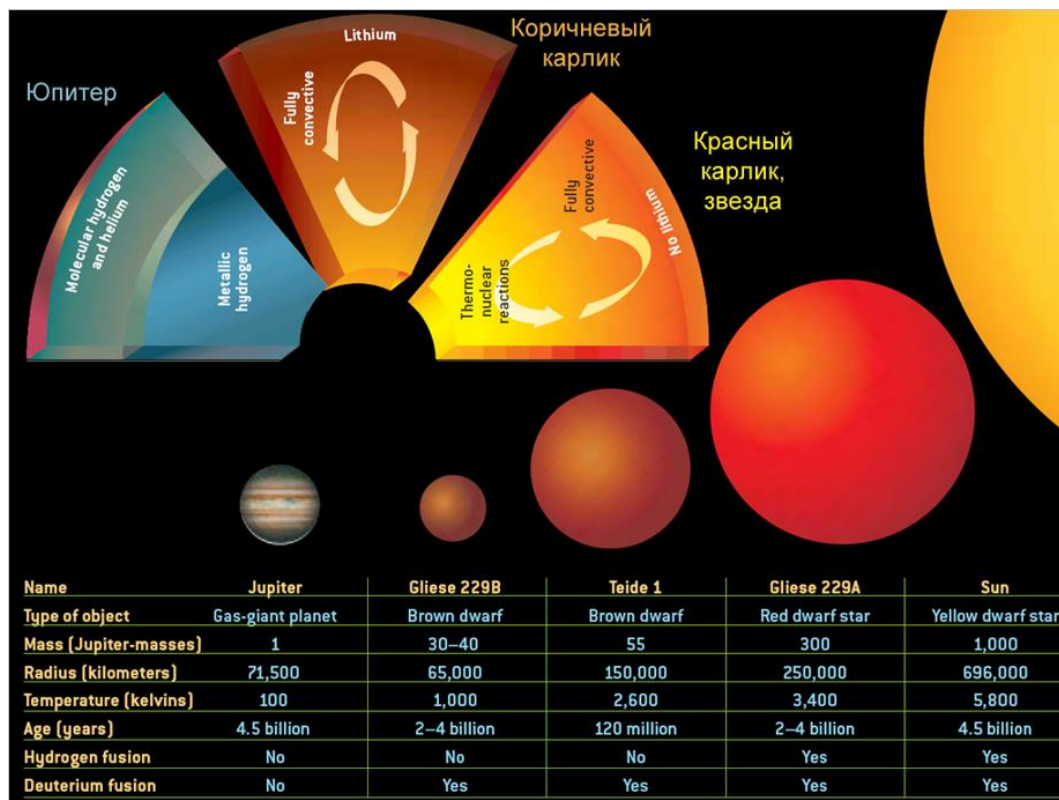


Рис. 8.35. Размер, масса, радиус и реакции звёзд разной массы

Происходящие в звезде **реакции** легко узнать по тому, какие **химические элементы** на её поверхности. Например, литий участвует в термоядерном синтезе при температурах, промежуточных между дейтерием и водородом. Если лития на поверхности не видим, это звезда, там он нырнул и уже превратился во что-то другое. А если видим, то это коричневый карлик: сколько бы литий не нырял, даже внизу нет таких температур, которые заставили бы его участвовать в синтезе более тяжёлых элементов. Такой способ надёжно отделяет красные карлики от коричневых.

### Жизнь и конечный этап эволюции звёзд

Мы уже говорили про эволюцию звёзд и рассматривали диаграмму Герцшпрунга-Рассела и движение звёзд при начальном этапе сжатия. И. Ибен в 1965 первым рассчитал

траектории, по которым протозвёзды приближаются к главной последовательности (рис. 8.36а).

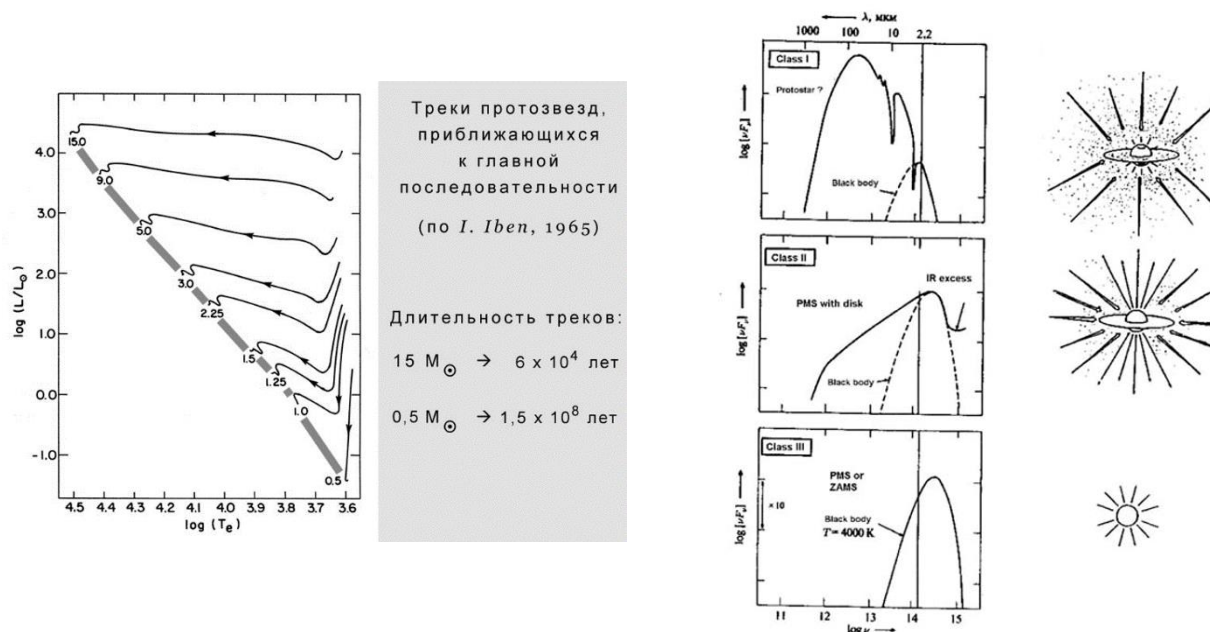


Рис. 8.36. а) траектории протозвёзд, приближающихся к главной последовательности, б) этапы формирования звезды и её спектры

Потом звезда оформляется в самостоятельное светило. Поначалу на неё ещё продолжает падать газ с периферии, в этом газе много пыли, звезду в оптике почти не видно (рис. 8.36б). Но она его нагревает, и от неё идёт огромное инфракрасное излучение.

Потом место вокруг звезды просветляется, оптическое излучение увеличивается, а инфракрасное уменьшается. А когда звезда уже отбросила всё лишнее, остаётся только оптическое излучение. Так **формирующиеся звёзды отделяются** от уже сформировавшихся.

У звезды в целом **отрицательная теплоёмкость**. Если в звезду каким-то образом впрыснуть энергию, она начнёт расширяться и на поверхности охладится.

Это явление объясняет, почему **получаются красные гиганты**. В недрах звёзды – то есть в центре звёзды типа Солнца – со временем количество водорода уменьшается, из него получается гелий (рис. 8.37а). Он в термоядерном синтезе пока участвовать не может, внутри Солнца ещё слишком холодно для этого, поэтому он накапливается как инертный элемент. Верхние слои его сжимают, и центральная плотность быстро нарастает. В конце концов она становится такой большой, что гелий загорается.

**Светимость звезды с возрастом** постепенно нарастает, потому что, когда гелий загорается, водород, который над горячим ядром в контакте с ним, начинает всё более интенсивно участвовать в термоядерных реакциях. Светимость звезды нарастает сначала медленно, а потом быстро (рис. 8.37б).



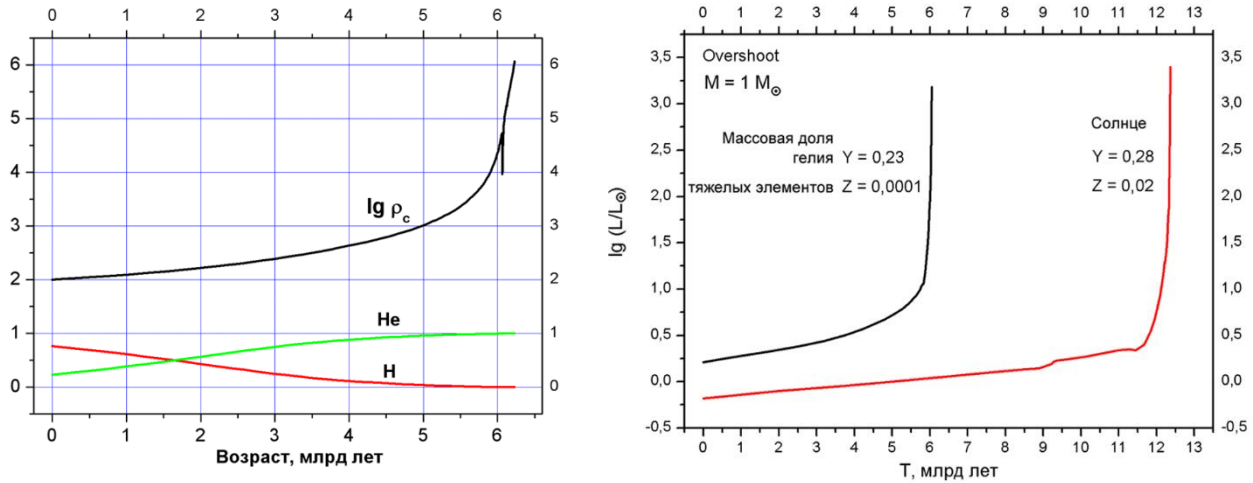


Рис. 8.37. эволюция плотности и хим. состава в центре звезды с массой Солнца, б) эволюция светимости звезды с начальной массой, равной массе Солнца

На рис. 8.38 показана эволюция светимости, размера и температуры поверхности для звёзд типа Солнца. Температура почти не меняется, в конце эволюции она лишь немногим меньше. А размер и светимость меняются сильно.

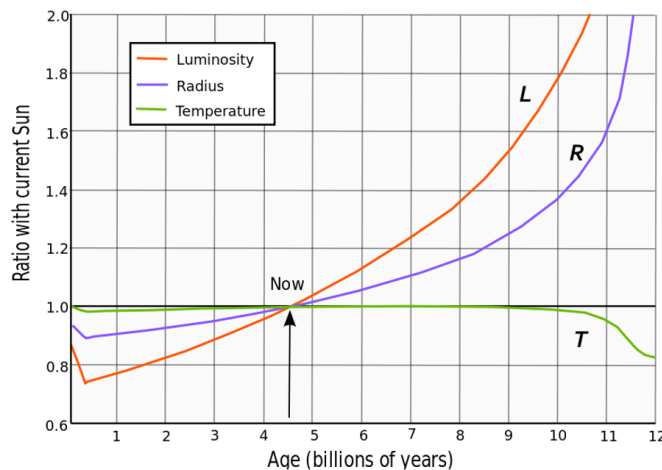


Рис. 8.38. Эволюция внешних параметров Солнца

Можно провести **аналогию** надувания воздушного шарика с получением из звезды красного гиганта. Когда шарик маленький, он непрозрачный. По мере надувания он становится всё более прозрачным, хотя количество резины при этом не уменьшается, просто она распределяется на большую площадь. Аналогично, когда генерация энергии внутри звезды увеличивается, её надо выпустить, иначе она будет нагревать звезду. Звезда расширяется и становится всё более прозрачной, и квантам (сначала гамма-диапазону, потом свету) становится легче её покинуть.

Красный гигант должен быть большим, иначе не сможет выпустить из своего ядра увеличивающийся поток тепла. И с главной последовательности звезда постепенно уезжает в область звёзд большого размера, но не очень высокой температуры. **Солнце** с

момента рождения немного переместилось по главной последовательности (рис. 8.39а), но потом будет стремительно перемещаться в область красных гигантов, станет примерно в сто раз больше, чем сейчас (2 а. е. в диаметре).

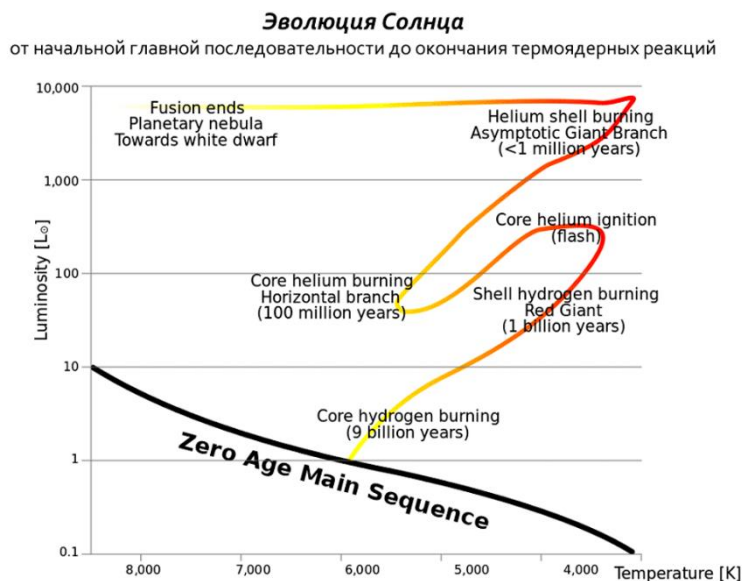
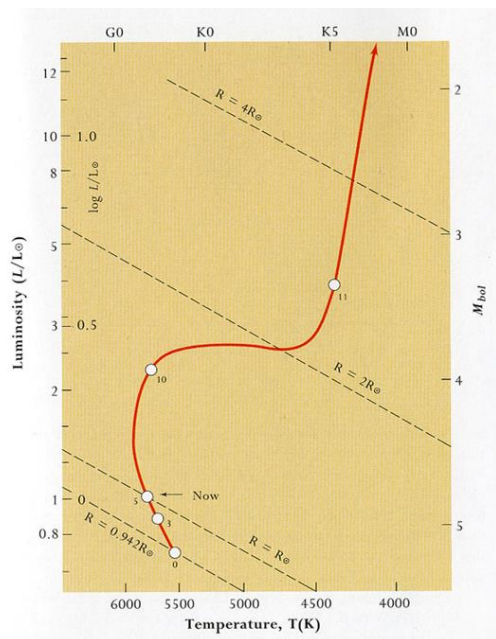


Рис. 8.39. а) теоретический трек эволюции Солнца с момента его «старта» на главной последовательности, б) будущая эволюция Солнца

Потом у него загорится гелиевое ядро, и Солнце немного сожмётся, потому что будет выходить уже не такой большой поток тепла, водород будет не так интенсивно гореть на расширяющемся гелиевом ядре (рис. 8.39б). Дальше гелий сторит, Солнце станет сверхгигантом и затем сбросит оболочку.

Мы рассматривали таблицу на рис. 8.35, чтобы понять, что от массы звезды зависит время её жизни.

Представим, что в звёздном скоплении родилась **серия звёзд разной массы** (рис. 8.40а). Первыми пройдут свою эволюцию самые массивные и уйдут в красные гиганты. Потом с главной последовательности уйдут менее массивные и т. д.

По виду диаграммы Герцшпрунга-Рассела для конкретной группы родственных звёзд, одновременно родившихся примерно из одного вещества, можно определить **возраст группы**. На рис. 8.40б все диаграммы совмещены своими нижними частями, там все звёзды будут очень потихоньку гореть почти вечно.

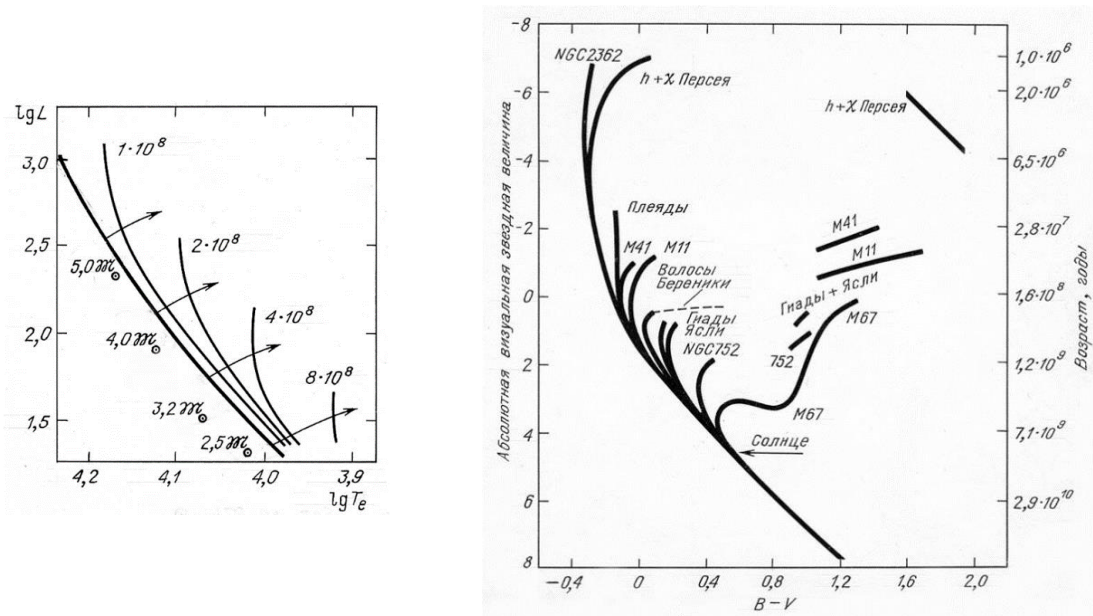


Рис. 8.40. а) эволюция серии звёзд разной массы, б) эволюция разных звёздных скоплений

**Шаровые скопления** имеют примерно такую же диаграмму (рис. 8.41).

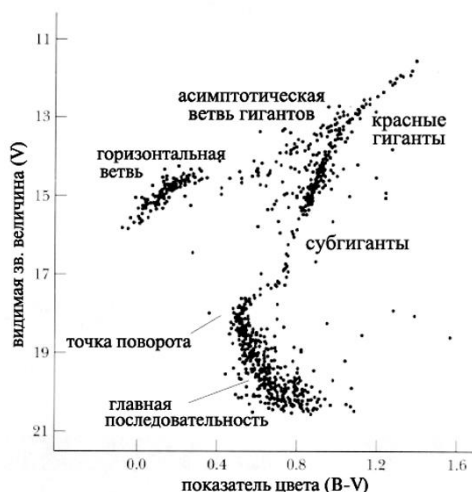


Рис. 8.41. Диаграмма для шарового скопления

В конце эволюции, расширившись, звезда начинает терять свои внешние слои. Притяжение всё равно работает к центру, а внешние слои очень сильно от него удаляются, и там вещество уже не удержишь.

Долго не могли понять, что будет с Землёй, когда Солнце начнёт превращаться в красный гигант. Расчёты, сделанные примерно 20 лет назад, **показывали процесс расширения Солнца** (рис. 8.42а), но каждый раз теория показывала, что расширение происходит практически до орбиты Земли. Меркурий и Венера заглатывались Солнцем в процессе расширения.

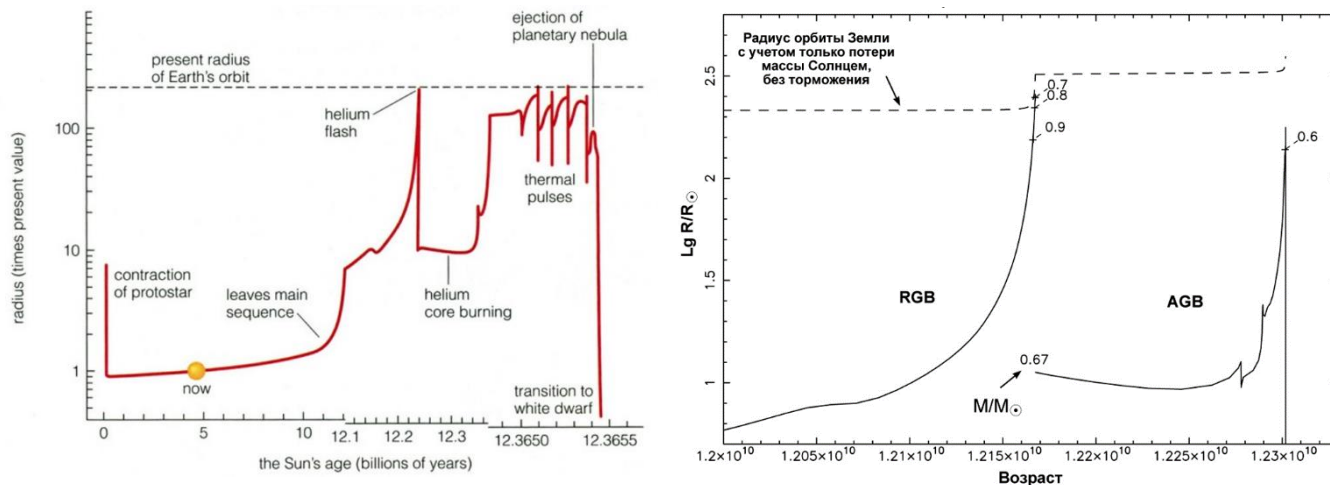


Рис. 8.42. а) расширение Солнца, б) радиус Солнца в конце эволюции и орбита Земли

На первом этапе расширения Солнце сбросит примерно 30% массы. Это даёт Земле перспективу сохраниться, потому что, когда у Солнца уменьшится масса, её орбита увеличится (рис. 8.42б).

На рис. 8.43а показан результат самых последних расчётов с учётом очень многих второстепенных факторов. Рассматриваются последние 4 млн лет жизни Солнца, когда оно превращается в красный гигант. Меркурий и Венера будут проглочены, Земля будет немного удаляться от Солнца, а дальше начнётся её приливное взаимодействие с верхними слоями солнечной атмосферы. Земля будет возбуждать на поверхности Солнца приливную волну и сама при этом будет тормозиться. Затем Земля приблизится, нырнёт в солнечную атмосферу и распадётся на атомы.

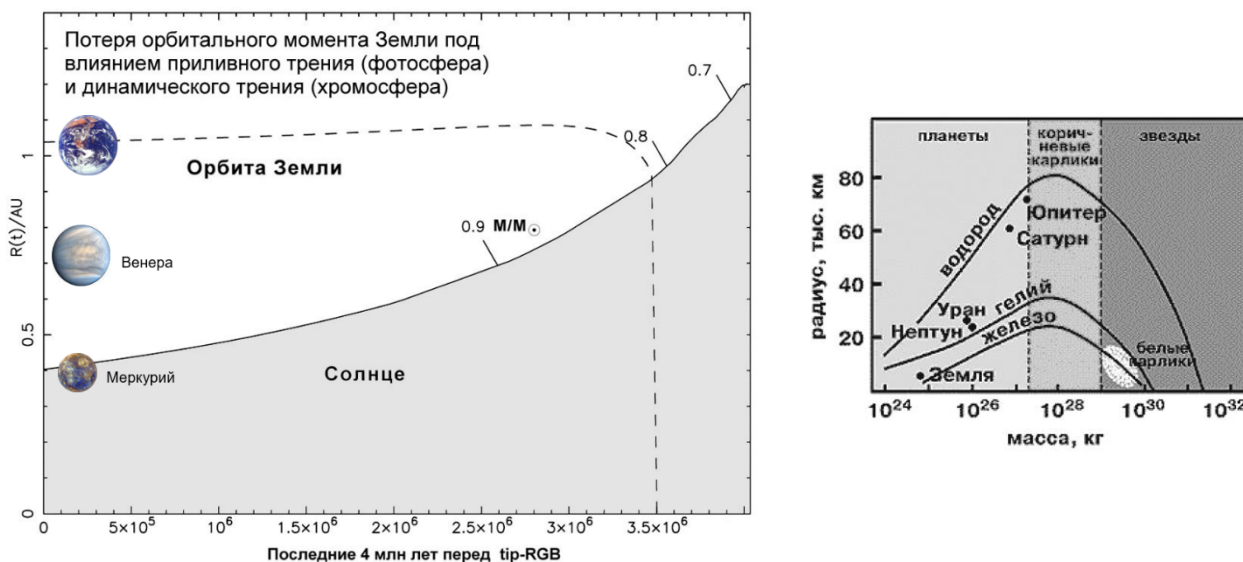


Рис. 8.43. а) Земля в последние 4 млрд лет жизни Солнца, б) зависимость радиуса от массы для планет, коричневых карликов и звёзд

До Марса Солнце точно не доберётся. Оболочка продолжит расширяться, но она будет уже такая холодная и разреженная, что следующим планетам ничего не будет грозить.

У многих солнцеподобных звёзд, которые старше Солнца, мы уже видим **этап расширения оболочки**.

Остаётся ядро звезды, уже лишённое источников тепла. Сначала оно ещё горячее, но потом остынет. На рис. 8.43б **диаграмма**, где по оси *x* **масса**, а по оси *y* **размер** холодного тела. У планет всё просто: чем она массивнее, тем больше по размеру. Юпитер уже достиг почти максимального размера для гелий-водородного состава. Если на него добавить ещё вещества, он чуть-чуть увеличится, а дальше начнётся уменьшение размера, то есть вещество не будет способно сопротивляться давлению вышележащих слоёв. Впервые расчёты этих диаграмм сделал С. Чандрасекар.

Массивные звёзды не останавливаются на синтезе гелия. У них чем глубже, тем горячее и плотнее вещество, и в них образуются **слои элементов вплоть до группы железа** (рис. 8.44). То есть цепочка термоядерных реакций нарастает и формирует половину таблицы Менделеева.

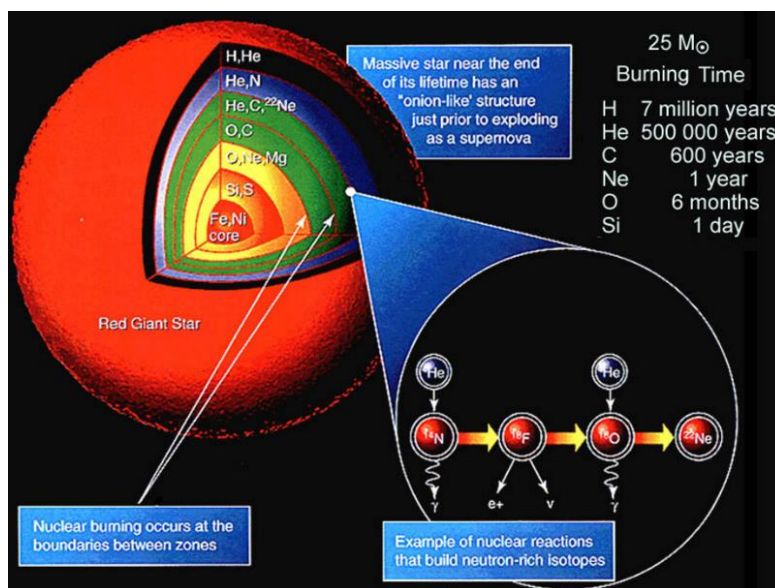


Рис. 8.44. Слои элементов вплоть до группы железа в массивной звезде у красного сверхгиганта

Таким образом, у **красного сверхгиганта** внутри «матрешечное» ядро из всей совокупности элементов от водорода до железа и никеля, а снаружи жидкая водородная оболочка.

Надо было как-то объяснять иногда происходящие **взрывы новых и сверхновых** звёзд. В. Бааде и Ф. Цвикки поняли, что ядра массивных звёзд должны сжаться почти до плотности атомного ядра. Так была впервые высказана идея **нейтронных звёзд**.

Но при сжатии ядра до состояния нейтронной звезды, то есть фактически до состояния ядерной плотности, выделяется такая энергия, что, по сути, получается взрыв звезды. Такие взрывающиеся звёзды мы видим и называем их **сверхновые** (рис. 8.45а). Их обозначают SN, дальше идёт год открытия и латинская буква по порядку их обнаружения в данном году. На таких фотографиях обычных звёзд не видно, и вдруг появляется новая. Мы понимаем, что это взрыв массивной звезды, и он настолько сильно повышает яркость, что звезда конкурирует с целой галактикой.

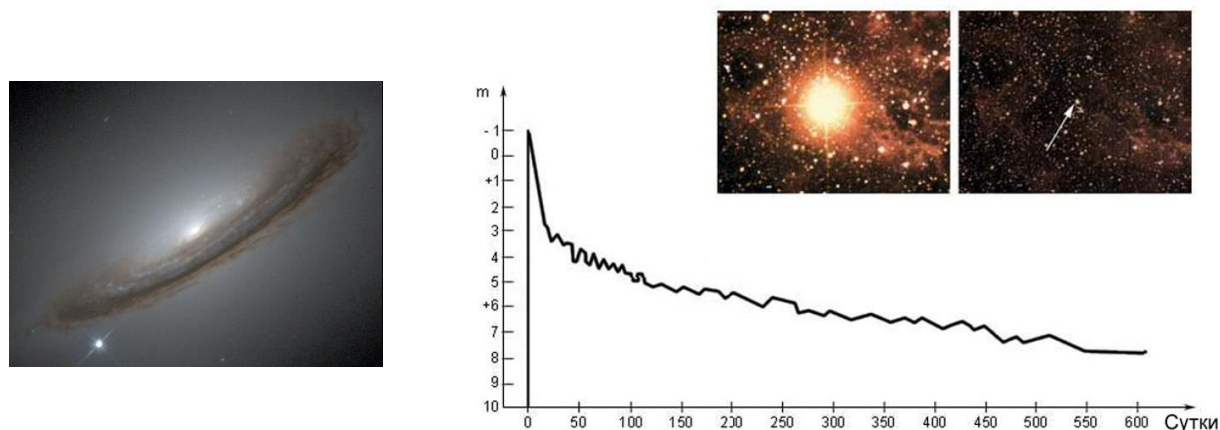


Рис. 8.45. а) взрыв сверхновой SN 1994D в галактике NGC 4526, б) кривая блеска сверхновой, вспыхнувшей в 1987 г.

Взрывы сверхновых – явления редкие, и изучать их трудно. В нашей Галактике такой взрыв видели в последний раз в 1604 г., хотя другие тоже происходят. Но все молодые звёзды живут в диске Галактики, как и мы, и от нас далёкие области диска закрыты пылевыми облаками.

Однако в других галактиках сверхновые видно лучше. На рис. 8.45б изображена самая изученная **сверхновая 1987 г.** Она вспыхнула в Большом Магеллановом облаке. Мы видели её до взрыва и сам взрыв. Её яркость поднималась почти до минус первой, поэтому её заметили невооружённым глазом и проследили весь ход остывания и распада химических элементов.

На рис. 8.46а мы видим **остатки разлетающейся звезды** от взрыва, который произошёл тысячу лет назад.

Первая же близко изученная вспышка сверхновой поставила астрономов в тупик. Мы говорили чуть раньше, что предок сверхновой – это красный сверхгигант, внутри которого ядро резко сжимается. А для звезды, взорвавшейся в 1987 г., он оказался голубым. После этого стали **перделывать теорию эволюции поздних стадий эволюции массивных звёзд**. Видимо, эта звезда сначала сбросила оболочку, а потом произошёл взрыв.

Множество **кривых блеска сверхновых** показывают нам, что есть **единообразие** – быстрый рост, потом медленное спадание, причём спадание происходит кусками

экспонент с разными показателями времени (рис. 8.46б). Это говорит о том, что там главным источником тепла является **распад радиоактивных элементов**. Сначала идут быстро распадающиеся, потом изотопы с более большим временем распада. Значит, в момент взрыва рождается много тяжёлых радиоактивных элементов.

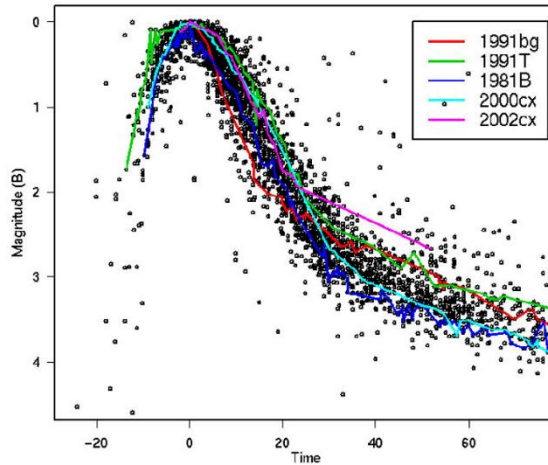


Рис. 8.46. а) остатки разлетающейся звезды, б) единообразии кривых блеска сверхновых

Это и есть **источник второй части таблицы Менделеева**. При взрыве большой поток нейтронов насыщает ядра железа и никеля избытком нейтронов, которые потом распадаются и превращаются в протоны, и ядро движется по таблице Менделеева в сторону урана и трансурановых элементов.

На рис. 8.47а приведена самая полная на данный момент картина того, чем становятся **звёзды разной массы в конце жизни**.

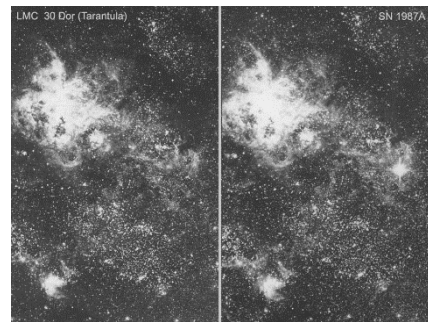
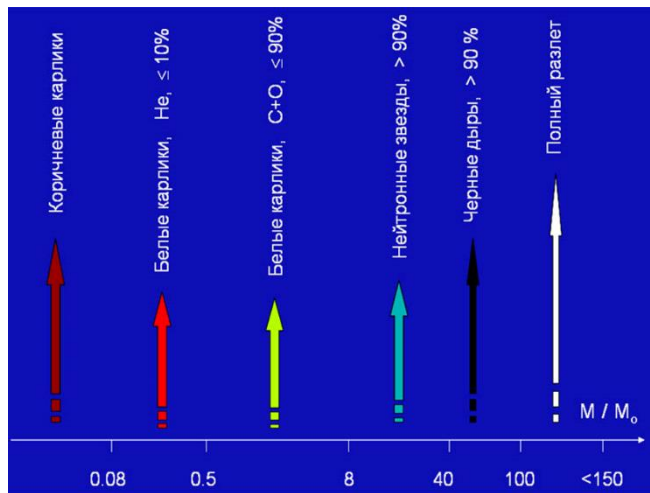


Рис. 8.47. а) конечный этап жизни звёзд разной массы, б) звёздное скопление F136

Самые лёгкие становятся коричневыми карликами. Звёзды малой массы превращаются в разные белые карлики: более лёгкие сбрасывают оболочку, остаётся гелиевое ядро; у более тяжёлых ядро дорастает до элементов типа углерода и кислорода.

Звёзды с массой от 10 масс Солнца и больше становятся нейтронными звёздами, ещё более массивные нейтронные звёзды превращаются в чёрные дыры. А самые массивные звёзды могут так взорваться, что не останется вообще никакого ядра.

Вообще звёзд с массой больше 100 масс Солнца очень мало, и они любят рождаться группами. В центре туманности Тарантула есть **звёздное скопление F136**, в котором 12 звёзд с массой больше 100 масс Солнца (рис. 8.476). Довольно маленькая галактика светится как 20% от всего Магелланова облака.



## Лекция 9. Переменные звёзды

### Причины переменности звёзд

Не так давно эта тема охватывала довольно маленькую группу звёзд, которые имели большую амплитуду переменности. Их можно было заметить глазом и на фотопластинке. Но со временем приёмники света становились всё чувствительнее и выяснилось, что **все звёзды переменные**, просто надо сказать, на каком уровне изменения блеска мы их можем наблюдать.

Соответственно, мы теперь не выделяем звёзды постоянного блеска и переменные, теперь нас интересует, почему они переменные, какие физические и не физические процессы влияют на их блеск.

Когда физики говорят об **амплитуде колебания** (а любое колебание, как правило, раскладывается в ряд Фурье, и получается набор синусоид и косинусоид), то термин амплитуда имеет отношение к полуразмаху этого колебания, потому что перед синусом и косинусом стоит число, называемое амплитудой, а сами эти функции принимают значение от  $-1$  до  $1$ . А в астрономии график изменения блеска звезды редко имеет правильную форму, и амплитудой называется полный размах (рис. 9.1).

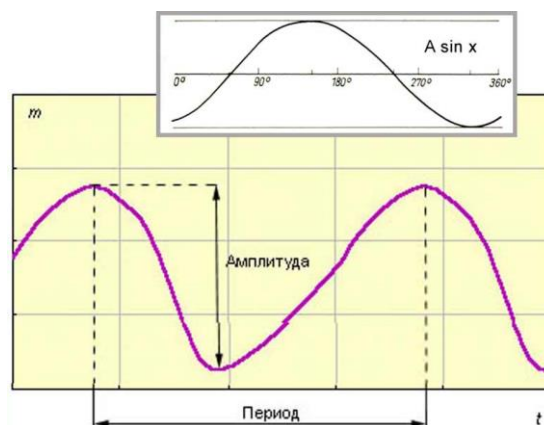


Рис. 9.1. Амплитуда колебаний в физике и в астрономии

Первые переменные были **двойными звёздами**. У них очень большая амплитуда переменности. Классическая переменная звезда – **Алголь** (рис. 9.2а). Никакого отношения к физическому изменению самих звёзд факт переменности не имеет, просто луч нашего зрения проходит рядом с плоскостью орбиты, и **звёзды систематически закрывают друг друга**.

Одна звезда горячее, другая холоднее, а размер закрытой области фотосферы у обеих одинаковый, поэтому более горячая звезда демонстрирует более глубокое затмение. Также между главным и вторичным затмениями меняется блеск системы, потому что горячая звезда нагревает полусферу более холодной. Это называется **эффектом отражения** (прогрева).



Рис. 9.2. а) затменная переменная звезда Алголь, б) эффект эллипсоидальности

Бывают случаи, когда мы не попадаем в орбитальную плоскость и не наблюдаем затмений, но блеск всё равно меняется. В таком случае, как правило, работает **эффект эллипсоидальности** (рис. 9.2б) Звёзды находятся близко друг к другу, приливное влияние искажает их форму, соответственно, мы видим то большее сечение эллипсоида в первом приближении, то меньшее по малой оси. Уже это даёт переменность блеска, хотя прямых затмений нет.

Очень часто этот эффект накладывается на эффект отражения, и они **немного компенсируют друг друга**. Это хорошо видно, если смотреть вдоль оси, соединяющей звёзды.

Есть звёзды, у которых эти **эффекты так наложены друг на друга**, что их трудно разделить. **β Лиры** – тесная двойная система, там два голубых гиганта (рис. 9.3). В ней сильные эффекты эллипсоидальности и отражения, а также они обмениваются веществом и окружены общей оболочкой, поэтому мы вообще не видим периодов стационарного блеска.

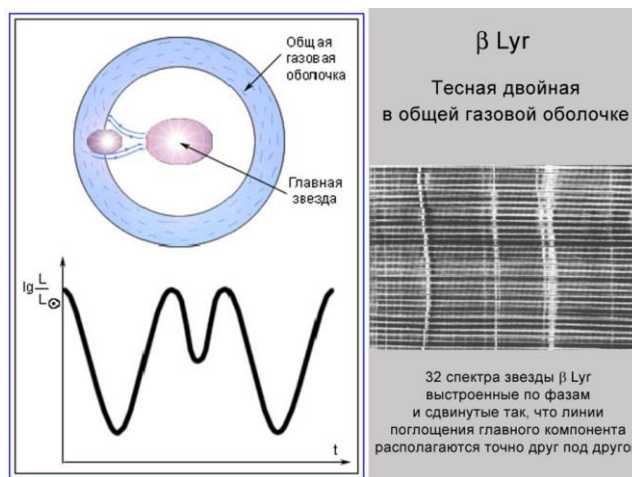


Рис. 9.3. β Лиры

На рис. 9.4 показана серия спектров, которые точно совмещены по длине волны. На нём видно, как из-за доплеровского эффекта, связанного с орбитальным движением звёзды, линии звёзд колеблются.

Данную систему исследуют до сих пор, она постоянно меняет свои параметры: истечение то сильнее, то слабее.

На рис. 9.4 показаны иллюстрации, которые хорошо показывают, как внешний вид кривой блеска зависит от геометрии системы: соотношения размеров звёзд, их относительной близости и т. д.

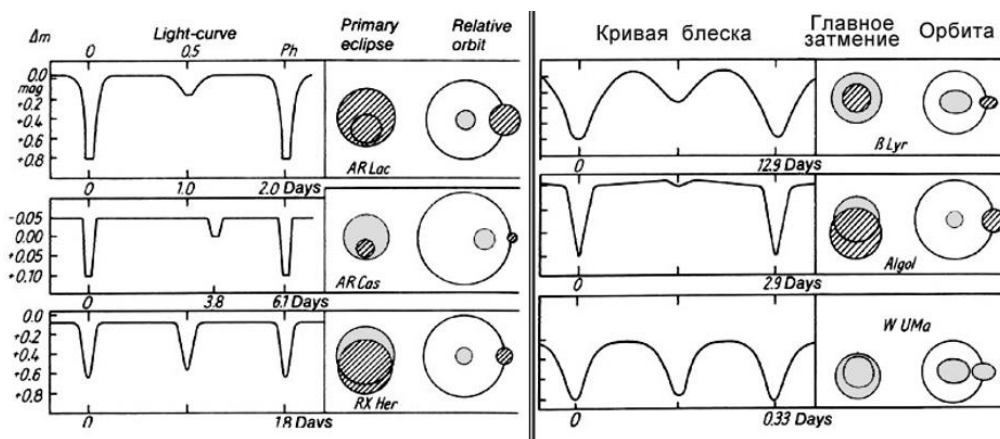


Рис. 9.4. Зависимость кривой блеска от геометрии системы, типы переменных

Каждая типичная кривая блеска имеет своего прародителя, и здесь представлены основные типы. По кривой блеска можно определить, какого типа переменная, и более-менее определить геометрию, например, круговая орбита или нет. Если вторичное затмение на графике точно посередине между двумя главными, то, скорее всего, орбита круговая.

Но точно восстановить параметры орбиты по кривой блеска обычно не удаётся. Надо наблюдать доплеровский эффект, то есть кривую лучевой скорости, и уже по ней понятна геометрия (рис. 9.5).

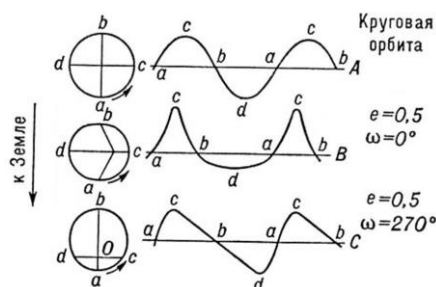


Рис. 9.5. Определение геометрии орбиты по кривой лучевой скорости

П. Н. Холопов долгие годы руководил отделом переменных звёзд в ГАИШ, поддерживающим **Всемирный каталог переменных звёзд**.

На первый взгляд Солнце очень стабильная звезда, но у него на поверхности тоже возникают и пропадают элементы, которые **меняют полный поток света от Солнца** (рис. 9.6а). Полный поток энергии они меняют не сильно, потому что хоть пятно и холодное, но тепло, которое не вышло из него, всё равно выйдет из близлежащих областей. Поэтому Солнце работает стабильно, но **в разных диапазонах излучения** оно

всё равно **переменное**. В оптике это изменение составляет сотую долю процента, но космические телескопы его хорошо замечают.

Наземные телескопы по причине атмосферной неустойчивости (турбулентности) измеряют в хороших условиях до сотой доли звёздной величины. Все звёзды, у которых переменность блеска меньше, мы называем постоянными, если наблюдаем с Земли. Но в космосе можно достичь точности в 1/10000 звёздной величины, и тогда все звёзды становятся переменными.

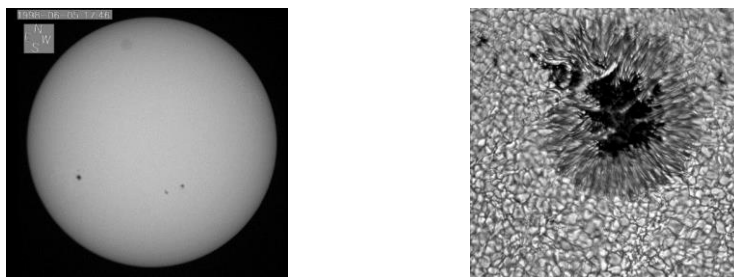


Рис. 9.6. а) элементы на поверхности Солнца, б) пятно на Солнце

На рис. 9.6б показано **пятно на Солнце**. Вне пятна поверхность нормально кипит, а в области пятна магнитное поле усилено, ионизованному газу трудно прорваться сквозь силовые линии, и он там тормозит, остывает, опускается. На самом деле пятно – глубокая вмятина в атмосфере Солнца, куда устремляются водопады горячего вещества из «полутени». Там они остывают, потому что и они не могут уйти ниже сквозь магнитные потоки, и снизу к ним горячие потоки газа не могут подойти.

Если посмотреть на Солнце в коротковолновых диапазонах – **ультрафиолетовом, рентгеновском**, – оно значительно сильнее меняет свой блеск и становится явно переменным. Хотя в этих диапазонах общий поток невелик, там Солнце выпускает сотые доли светимости, зато поток меняется на десятки или даже на сотни процентов.

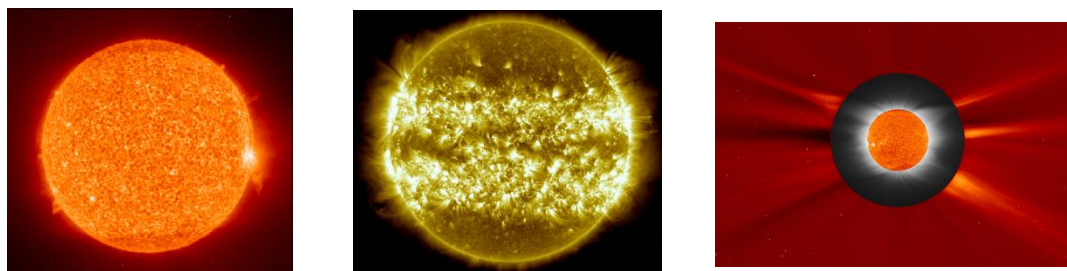


Рис. 9.7. а) Солнце в рентгеновском диапазоне, б) наложенные друг на друга фотографии, в) солнечная корона в рентгеновском диапазоне

Так, как изображено на рис. 9.7а, Солнце можно увидеть. А на рис. 9.7б представлены наложенные друг на друга фотографии, которые показывают, на каких **широтах** Солнце наиболее активно демонстрирует **изменения** своей **светимости**. Видно, что на полюсах оно спокойное, вдоль экватора тоже более-менее спокойное, а на широтах от 15 до 35 градусов самые беспокойные места.

Можно рассмотреть ещё более далёкие от поверхности области. **Солнечная корона** есть всегда, но бывают мощные корональные выбросы с поверхности, когда она светится в жёстком рентгеновском диапазоне с температурой 3000 градусов (рис. 9.7в). А иногда она очень спокойная. Корону мы видим только в моменты затмений, и от затмения к затмению она меняется очень сильно. Если судить только по ней, то Солнце крайне переменная звезда с характерным временем в несколько месяцев.

**Красные гиганты** – постаревшие звёзды главной последовательности – становятся очень переменными. Они бурлят и покрыты крупными тёмными и светлыми пятнами (рис. 9.8). На Солнце пятна маленькие (1–1,5 тыс. км), а конвективные потоки (бурление) ещё меньше, и, складываясь, они уравнивают друг друга. В сумме мы не видим сильной переменности.

Для построения **модели красного гиганта** сначала берётся равновесная модель сферически симметричной звезды, но в начале счёта накладывается маленькая неоднородность: маленькие пятнышки раскладывают по сферическим гармоникам, гармоники довольно высокого порядка немного возмущают модель. Дальше конвекция развивается, и это приводит к тому, что на фоне звезды возникают крупные ячейки с размером порядка радиуса звезды.

Когда подогревается слой газа или жидкости, размер конвективных ячеек всегда порядка толщины слоя, в котором происходит конвекция. Слишком длинные или широкие ячейки разобьются на части, а устойчивый **характерный размер ячейки** равен характерной толщине слоя. Для жидкости это просто толщина слоя, а если речь о звезде, то плотность в слое сильно меняется, чем выше, тем атмосфера разреженнее. Тогда речь идёт о характерной (равновесной) толщине, где плотность меняется в  $e$  раз.

У красных гигантов очень **протяжённая атмосфера**, и её параметры очень медленно меняются с расстоянием от центра звезды. Из-за этого характерная толщина атмосферы красного гиганта сравнима с размером звезды. Поэтому мы наблюдаем такие крупные конвективные ячейки.

На рис. 9.8 представлен финальный этап гидродинамической модели. Такие большие гранулы называют **супергранулами**.

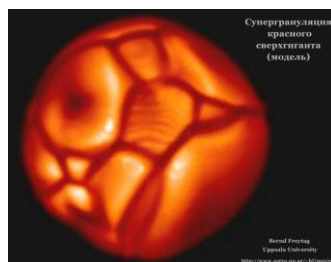


Рис. 9.8. Модель развития конвекции на красном гиганте

У **Солнца** тоже есть **супергранулы**, но мы их не видим. У него очень быстро меняются параметры в самом верхнем слое на расстояниях порядка тысячи км. Он очень быстро остывает, с глубиной температура и плотность быстро нарастают. Поэтому на

поверхности конвективные ячейки очень маленькие. А в глубине Солнца параметры меняются медленнее, и ячейки там более крупные.

Когда к Солнцу присмотрелись в спектральных линиях, которые тонко чувствуют вариации температуры, оказалось, что на фоне **мелкой фотосферной грануляции** есть ещё **большие области**, которые её охватывают, но расположенные **в глубине**. А на красном гиганте они выходят на поверхность.

**Пульсирующие переменные** звёзды не требуют двойственности, просто звезда сама по себе меняет свою светимость. Иногда она не очень сильно меняет общий поток, но заметно меняет его в определённом спектральном диапазоне.

Например, пульсирующая звезда типа **дельта Цефея**, сжимаясь, немного нагревается и в этот момент в оптическом диапазоне становится наиболее яркой (рис. 9.9). При расширении её поверхность немного охлаждается. В широком спектральном диапазоне светимость почти неизменна, но в оптическом диапазоне стало меньше квантов, они переместились в инфракрасный.



Рис. 9.9. Дельта Цефея

Геометрическая переменность позволяет измерять орбитальный период, массы. Но физическая гораздо интереснее, потому что она характерна для самой звезды и связана с её основными параметрами – массой, светимостью. А это даёт возможность определять по одному параметру другой.

На рис. 9.10а показана характерная **кривая блеска цефеид**. Довольно быстрый подъём при сжатии и медленный ступенчатый спуск. Первым физиком данного процесса объяснил радиофизик С. А. Жевакин.

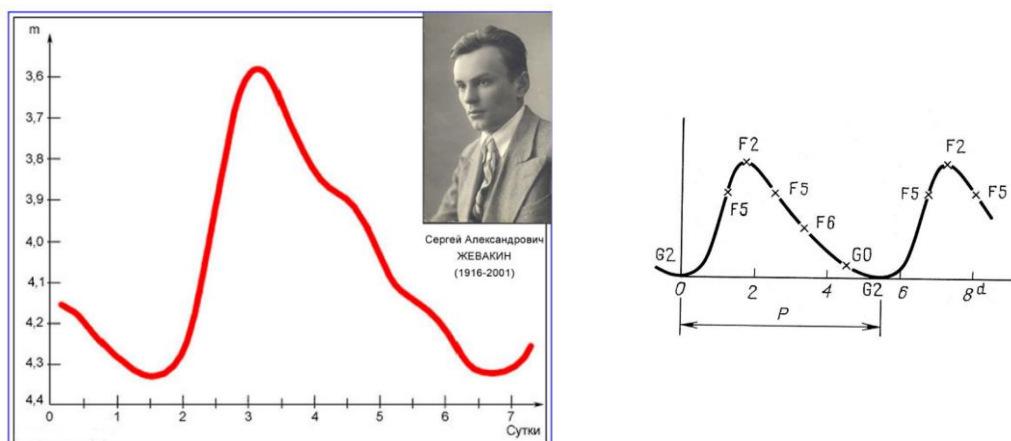


Рис. 9.10. а) характерная кривая блеска цефеид, б) изменение температуры вдоль кривой блеска цефеиды

**Цефеиды** – звёзды-гиганты, их поверхность довольно холодная. Под их фотосферой есть слой частично ионизованного гелия, играющий роль клапана. Если слой нагревается, гелий начинает ионизоваться, электроны отщепляются, на это идёт энергия, соответственно, её меньше просачивается к поверхности. Звезда немного остывает, дальше начинается рекомбинация, электроны возвращаются на атомы гелия и выплёскивает энергию. Получается **автоколебательная система**, на поверхности видны колебания яркости и небольшие физические колебания расширения и сжатия.

На рис. 9.10б показано, как **вдоль кривой блеска** цефеиды **меняется температура**. Она максимальная, когда достигается класс F, F2 соответствует примерно 8000 К. А потом она снижается до солнечной – 5800 К, что соответствует классу G2. Температурные колебания на поверхности мы наблюдаем как колебания яркости.

Х. Ливитт в начале 20 в. обнаружила у цефеид **линейную зависимость между периодом переменности**, то есть расстоянием между максимумами блеска, **и яркостью** звезды (рис. 9.11а). Звёздные величины – логарифмы, поэтому периоды переменности тоже в логарифмической шкале. Яркость звезды зависит ещё и от расстояния данной звезды от нас, но Ливитт изучала Малое и Большое Магеллановы облака, и так как это соседние галактики, там все цефеиды удалены на одинаковое расстояние. Но из-за того, что Малое Магелланово облако чуть подальше от нас, чем Большое, шкалы немного не совмещаются.

Однако это видимые звёздные величины для данных галактик. Если бы удалось найти хоть одну цефеиду рядом с нами и измерить её геометрический параллакс, то есть очень надёжно определить расстояние, мы бы уже могли калибровать такую зависимость к абсолютным звёздным величинам, то есть к реальной светимости звёзд. Тогда это стало бы надёжным методом измерения расстояний: можно было найти цефеиду в соседней галактике, измерить её период за полгода наблюдений и по такой зависимости вычислить реальную светимость.

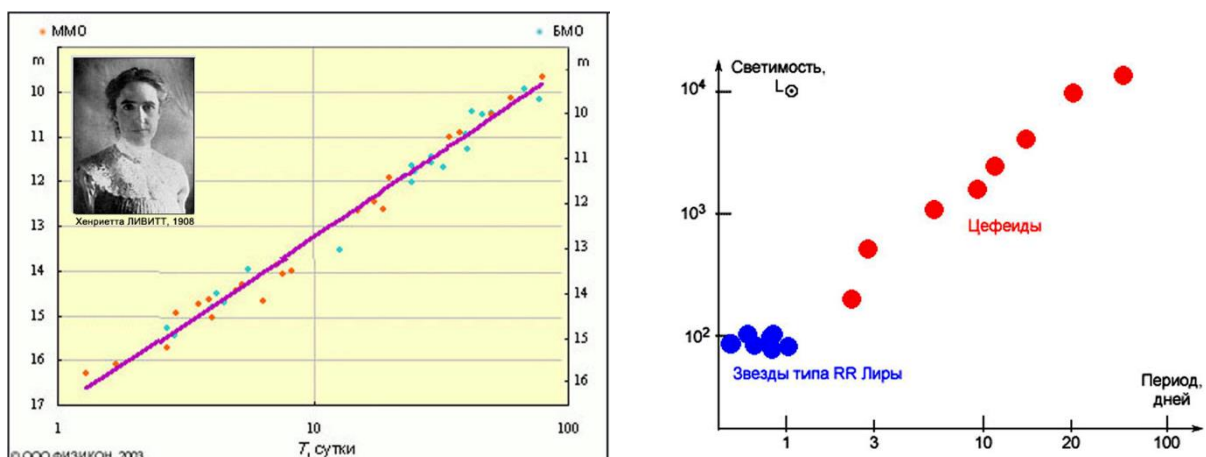


Рис. 9.11. Линейная зависимость между периодом переменности и яркостью цефеид,  
 б) зависимость светимости цефеид от периода изменения блеска

В конце концов такую зависимость определили. На рис. 9.11б представлены уже **реальные светимости звёзд**, имеющих тот или иной **период изменения блеска**. Рядом с нами нет цефеид, но постепенно телескопы стали смотреть всё дальше и дальше, и даже для далёких цефеид нашей галактики геометрическим параллаксом очень хорошо определяются расстояния. Параметры данной зависимости, выведенные Л. Берниковым, в мире считаются стандартом.

Есть группа пульсирующих звёзд, показанная синим цветом. Они вроде бы тоже цефеиды, но малометаллические. Их называют звёзды **типа RR Лиры**. Их сначала обнаружили в шаровых скоплениях, но такие скопления – древние объекты, которые, возможно, родились даже до формирования галактики. Они не показывают зависимости между периодом и яркостью, все имеют примерно одинаковый блеск и маленькие периоды колебаний.

RR Лиры и обычные **цефеиды** называют **правильными** (рис. 9.12). Они показывают очень чёткий период, который всегда можно измерить. А есть **полуправильные**, например,  $\alpha$  Кита или сверхгигант  $\mu$  Цефея, у которых наблюдаются физические пульсации. У них даже можно было бы указать характерный период, но он ненадёжный, неустойчивый, причём есть вековые тренды. Поэтому для них связать яркость с периодом сложно.

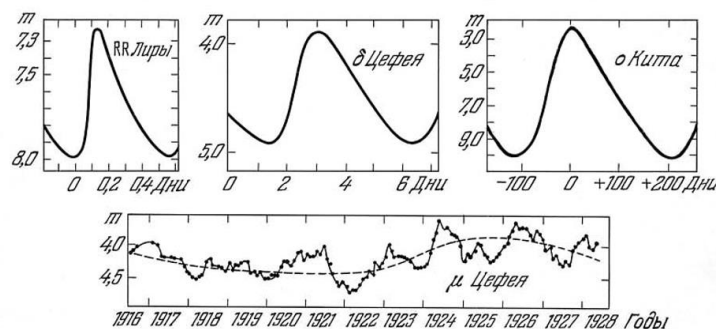


Рис. 9.12. Правильные и полуправильные цефеиды

Клапанный механизм выхода энергии на поверхность звезды работает при температурах поверхности от 7 до 11 тыс. К. На диаграмме Герцшпрунга-Рассела можно выделить **полосу неустойчивости** (рис. 9.13а), но вообще она тянется ещё ниже и пересекает главную последовательность.

Попадая в течение своих эволюционных движений в эту область, звезда почти всегда становится переменной. Звёзды главной последовательности почти не демонстрируют переменности, её редко удаётся заметить из-за маленькой амплитуды. А такое показывает, например, RRs Лиры (рис. 9.13б).



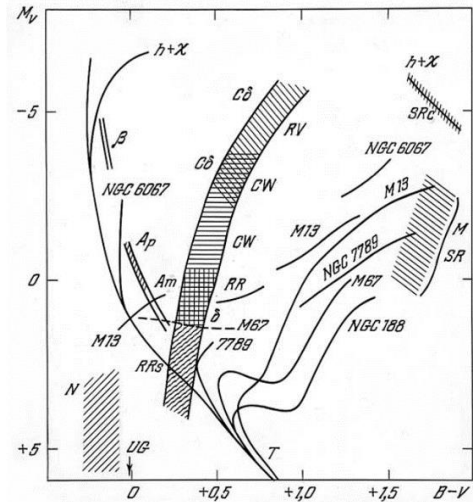
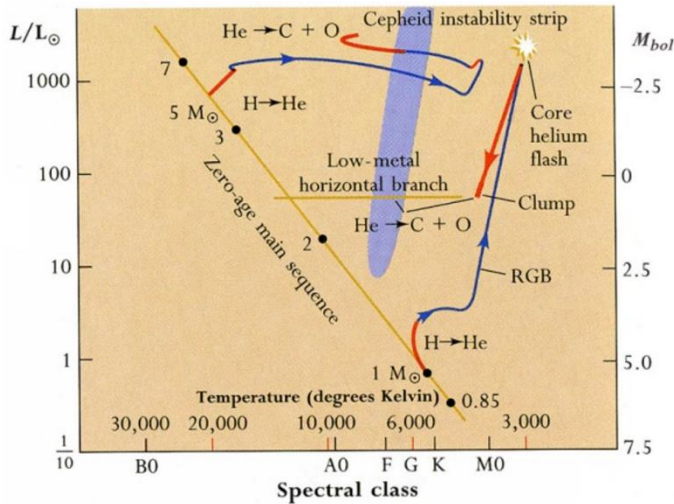


Рис. 9.13. а) полоса нестабильности на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, б) переменные звёзды главной последовательности

**Связь между периодом и светимостью** (абсолютной звёздной величиной) у разных звёзд разная (рис. 9.14а). Поэтому надо уметь отделять один вид переменности от другого, тогда можно точно выйти на светимость звезды и по видимой яркости точно определить расстояние до неё.

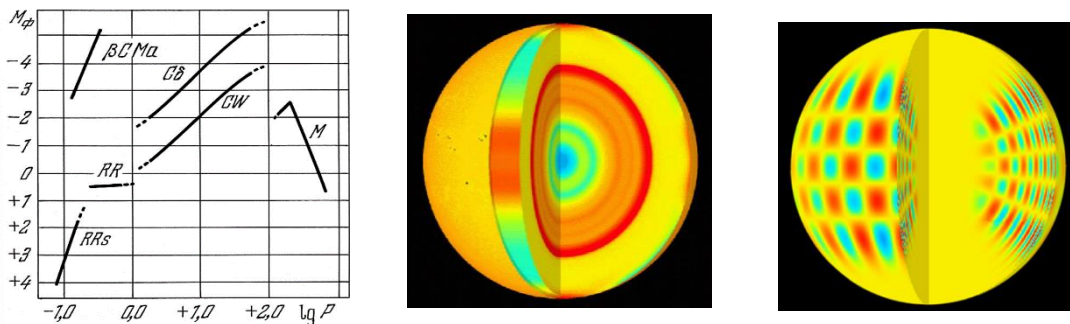


Рис. 9.14. а) связь между периодом и светимостью у переменных разного типа, б) распространение колебаний поверхности Солнца, в) модель мелкомасштабных колебаний со сферическими функциями

Типов колебаний звёзд очень много. **Солнце** тоже испытывает колебания, но они типа **акустических волн** (рис. 9.14б). Внутри Солнца довольно широкая конвективная область, конвекция идёт уже начиная с середины радиуса, причём сначала крупномасштабная, а ближе к верхним слоям масштаб всё мельче. Конвекция – это поток газа, который движется с околосвуковой или сверхзвуковой скоростью. Происходит диссипация кинетической энергии, заметная доля энергии переходит в звук. Солнце гудит, на поверхность звук тоже выходит, и наблюдаются **мелкие и крупные колебания поверхности**.

По устойчивым колебаниям поверхности звезды мы понимаем, как звук просачивается изнутри наружу, и по этому восстанавливаем **распределение плотности**

(рис. 9.14в). Этим занимается гелиосейсмология. **Характерное время** мелкомасштабных колебаний на поверхности Солнца от 5 до 20 минут.

При изучении Солнца мы можем направлять телескоп на отдельные части поверхности, и тогда по доплеровскому эффекту легко наблюдаем **колебания в спектре**. А если смотреть на звезду издалека, и она вся проваливается в телескоп, тогда всё усредняется, и с Земли заметить мелкомасштабные колебания невозможно. Однако реально со спутников, этим занимается астросейсмология.

### Переменность в системах двойных звёзд

Существует также **катаклизмическая переменность**, связанная со взрывами. На отдельных звёздах или в двойных звёздных системах бывают катаклизмы. Тоже получаются переменные звёзды, у которых меняется блеск, но это происходит катастрофически и, как правило, связано с близким расположением компонентов двойной системы.

Их называют **симбиотическими звёздами**, потому что при наведении спектроскопа кажется, что одна звезда, а после получения спектра видно совмещение двух несовместимых спектров. Например, видны молекулярные линии, характерные для холодной атмосферы, и рядом линии ионизованного гелия, которые бывают только при высокой температуре. Потом выясняется, что действительно рядом две звезды – маленькая плотная горячая (или имеющая горячий аккреционный диск из падающего вещества) и красный гигант (рис. 9.15а).

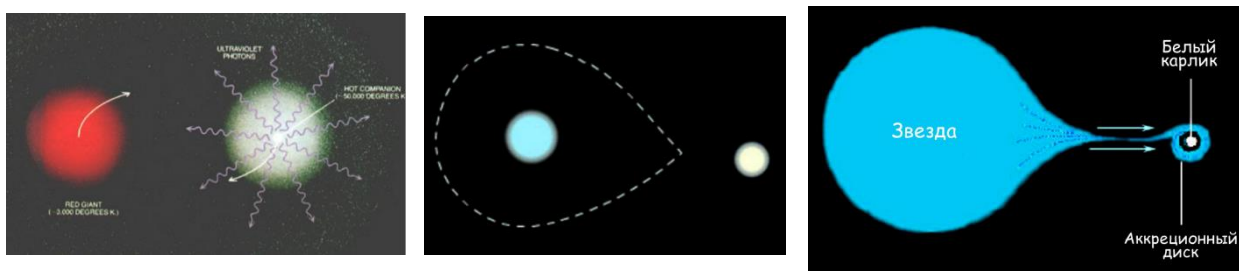


Рис. 9.15. а) симбиотические и эруптивные переменные, б) полость Роша звезды, в) аккреция в системе из нормальной звезды или красного гиганта и белого карлика,

Как правило, такие симбиотические звёзды бывают и **эруптивными**, то есть резко и непрогнозируемо меняющими свою яркость. Это, как правило, связано с тем, что поток газа перетекает на более горячий и компактный компонент и по разным причинам вызывает вспышки яркости.

Он перетекает, когда области гравитационного контроля (**полость Роша**) звезды заполняются ещё веществом, и тогда через точку Лагранжа или близкое к ней пространство звёздное вещество начинает падать на второй компонент, попадая в полость Роша другой звезды (рис. 9.15б). Часть может улететь, а часть остаться рядом и упасть на звезду.

Наиболее интересный вариант – когда **одна звезда нормальная или расширяется** в стадии **красного гиганта**, а **вторая компактная**, например, **белый карлик** (рис. 9.15в).

Таких двойных систем очень много, не все они обмениваются веществом. Например, Сириус А нормальная звезда спектрального класса А, Сириус В белый карлик. Орбитальный период 50 лет, расстояние чуть меньше, чем от Солнца до Юпитера. Сегодня они не обмениваются веществом, но когда Сириус А войдёт в стадию красного гиганта, начнётся падение его атмосферы на Сириус В.

На рис. 9.16а представлен пример наблюдения такого обмена. **Мира** (о Кита) – красный гигант, демонстрирующий переменность блеска. Если смотреть в оптике, интерферометр показывает не совсем сферическую форму, в ультрафиолете виден уже поток газа, а в рентгеновском диапазоне мы видим **горячий газ**, который подлетает ко второму компоненту (белому карлику).

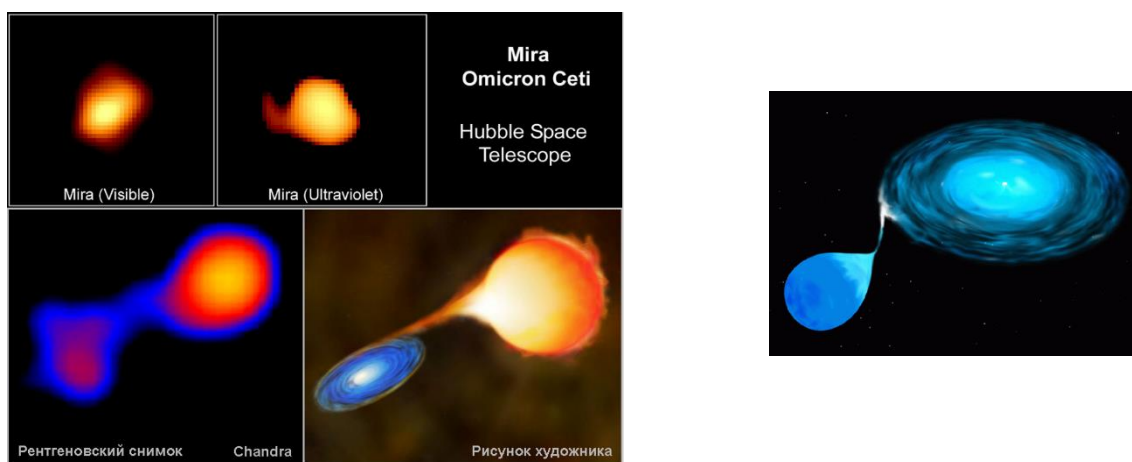


Рис. 9.16. а) аккреция у звезды Мира в оптическом, ультрафиолетовом и сферическом диапазонах, б) детали системы с аккрецией

Можно наблюдать много разных проявлений данного явления и по ним восстанавливать **детали данной системы**. Например, на рис. 9.16б чётко показало, что раз рядом с красным гигантом горячий источник света, гигант имеет более горячее и более прохладное полушарие. В наблюдениях **эффект отражения** тоже виден очень чётко. Перетекая на **аккреционный диск**, вещество ударяется, так как уже перетёкшее вещество несётся по кругу, а новое падает почти по радиусу. Таким образом, в месте, где они встречаются, всё время присутствует **горячее пятно**.

**Аккреция** – медленное перемещение вещества к центру тяготения. Система имеет орбитальное вращение, оба компонента движутся вокруг общего центра масс. Значит, вещество тоже имеет момент импульса, и, если оно начнёт перемещаться к центру притяжения, за счёт этого момента угловая скорость нарастает, и оно выходит на стационар, где уравнивается центробежная сила и гравитация. Получается **диск** с равновесием по координате  $z$  и сжатием по  $x$  и  $y$ .

Момент не сохраняется, потому что кеплерово движение таково, что чем дальше от горячей звезды, тем медленнее скорость вращения кольца диска: она пропорциональна  $\frac{1}{R^3}$ , как для планетной системы. В месте контакта слоёв, движущихся с разной скоростью, возникает **трение**, и внешние слои увеличивают свой момент импульса, а внутренние уменьшают. Внутренние слои сдвигаются внутрь, а внешние наружу, частично просто улетают из системы и уносят большой момент, а основная доля газа перемещается к компактной звезде.

То, как **вещество перемещается к звезде**, зависит от того, насколько велико трение. Если трения совсем нет, диск будет набирать вещество, становиться всё более плотным и массивным, и в какой-то момент в нём накопится столько вещества, что начинает работать трение. Тогда возникает турбулентность (взаимное перемешивание слоёв), а вслед за ней трение усиливается (обмен моментом начинает происходить более интенсивно). Соответственно, с какого-то момента большая часть газа перемещается из диска к белому карлику и падает на его поверхность.

Мы наблюдаем так называемые **карликовые новые звёзды**. Из-за неустойчивости аккреции в диске возникают периоды, когда диск почти обрушивается на звезду, ударяет по её поверхности, белый карлик нагревается, и происходит яркая вспышка в четыре звёздных величины (рис. 9.17). После этого газа в диске почти не остаётся, он набирает массу, потом опять происходит сброс вещества. Если приток вещества к диску равномерный, получается почти периодическая картина. Все такие звёзды относят к типу **U Gem**.

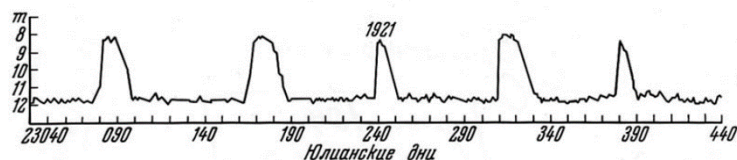


Рис. 9.17. Кривая блеска SS Cyg (типа U Gem)

Однако бывает так, что из-за накопления нового вещества на поверхности белого карлика у него на поверхности образуется **слой, богатый водородом** (рис. 9.18). Сами белые карлики водорода уже не содержат, это ядра звёзд, у которых водород уже сгорел. Белые карлики могут состоять из гелия, но чаще в них много углерода, азота.

Но если водород накапливается, за счёт огромной силы тяжести на поверхности звезды он прижимается и уплотняется до такой степени, что становится **вырожденным**. То есть давление в нём уже не зависит от его температуры: это квантовомеханическое давление, связанное просто с тесным расположением электронов в вырожденном электронном газе, когда электроны уже не могут находиться ещё ближе из-за принципа неопределённости, Паули и т. д.

Температура растёт, плотность тоже. Водород сам по себе очень медленно участвует в термоядерных реакциях, характерное время превращения протона в нейтрон

в протон-протонной цепочке в недрах Солнца миллиарды лет. Однако есть ещё **циклические ядерные реакции**, когда при наличии более тяжёлых атомов, например, углерода, реакция превращения водорода в гелий идёт очень быстро, потому что нет момента, когда нужно использовать слабое взаимодействие.

Поэтому, когда на поверхности белого карлика накапливается плотный и горячий слой водорода, в нём начинаются **термоядерные реакции**, температура повышается. Нормальная звезда в таком случае расширилась бы, охладилась и вышла на стационар. А здесь вырожденное вещество, в котором с повышением температуры давление не повышается, значит, расширения нет. В результате получается настолько быстрое сгорание, что вещество не успевает разлететься, то есть **взрыв**.

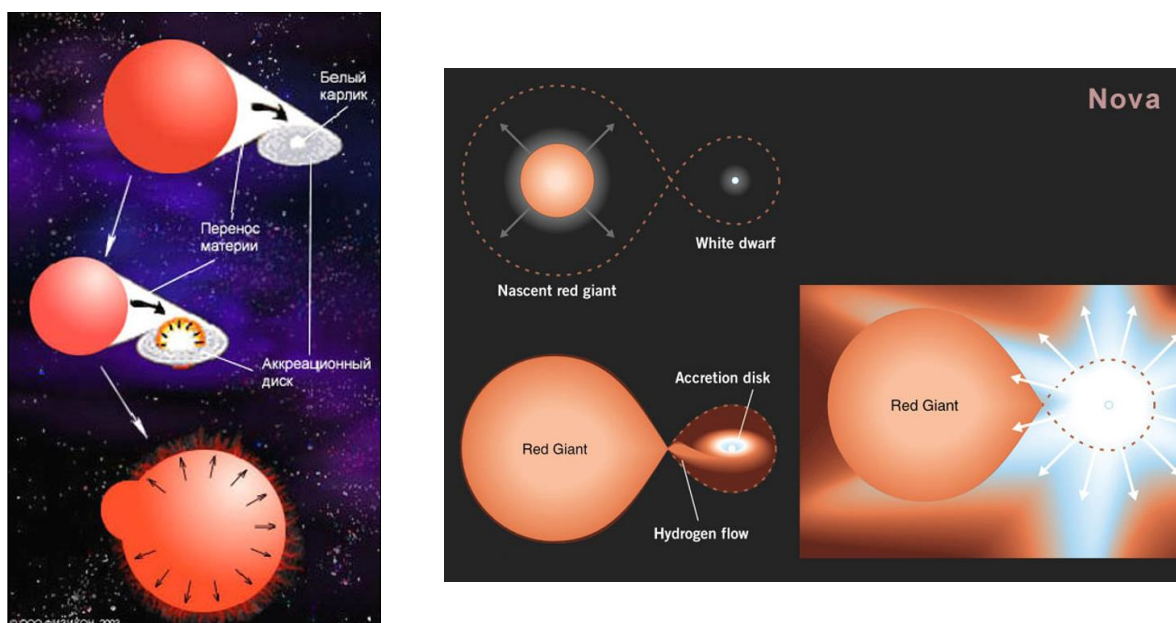


Рис. 9.18. Механизм вспышки новой звезды (Nova)

Такие взрывы не разрушают белый карлик. Они не очень мощные, причём происходят на поверхности, а звезда очень плотная, гравитация на ней сильная. Но такой взрыв на много порядков увеличивает суммарную светимость системы, сбрасывает часть газа. На поверхности белого карлика большой гравитационный потенциал, поэтому часть сгоревшего газа остаётся на ней в виде гелия. Потом накапливается новый водород и происходит новая вспышка.

Почти все звёзды такого типа показывают более-менее **периодические вспышки**. У некоторых звёзд мы видим их раз в 30–50 лет, расчёты для других показывают, что вещество для повторной вспышки в них накопится раз в 1000 лет. Все такие вспышки называются новыми звёздами.

На рис. 9.19а показан **результат вспышки в созвездии Персея**, случившейся в 1901 г. Теперь она попала в каталоги переменных звёзд, ей присвоили обычное обозначение GK. Сегодня мы видим разлёт взорвавшейся оболочки белого карлика. Её

суммарная масса невелика, поэтому ясно, что система сохранилась и, скорее всего, будут ещё вспышки.

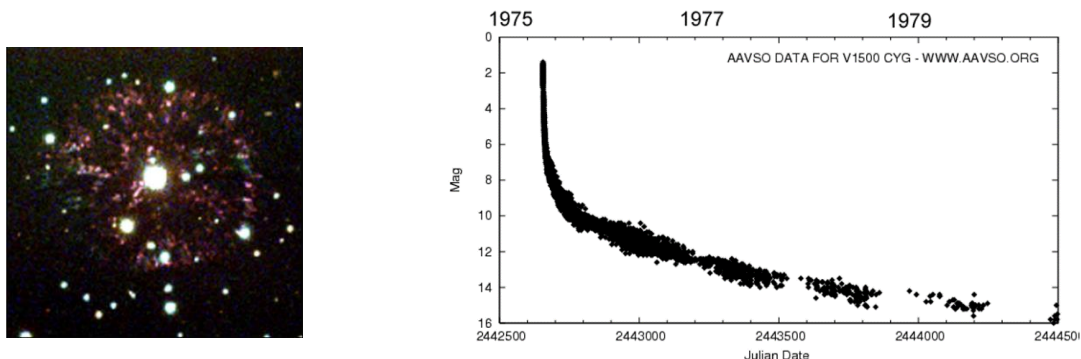


Рис. 9.19. а) GK Per Nova 1901, б) кривая блеска Новой 1975 г. в Лебеде (V1500 Cyg)

В 1975 г. в созвездии Лебедя С. Ю. Шугаровым была замечена вспышка. Она оказалась невероятно большой амплитуды (рис. 9.19б). Эта новая звезда была замечена в районе третьей звёздной величины, а максимум и спадение блеска наблюдали уже многие люди. У неё невероятная амплитуда – 14 звёздных величин.

### Релятивистские звёзды

**Релятивистские звёзды** остаются после жизни массивных звёзд (рис. 9.20а). Мы уже знаем, как эволюционируют звёзды на главной последовательности. Сначала звезда медленно идёт вдоль главной последовательности, потом поперёк ей, а дальше быстро уходит в область гигантов и сверхгигантов. Потом она сбрасывает верхние слои, ядро постепенно сжимается и превращается в белый карлик, который миллиарды лет остывает и в конце концов становится невидимым.

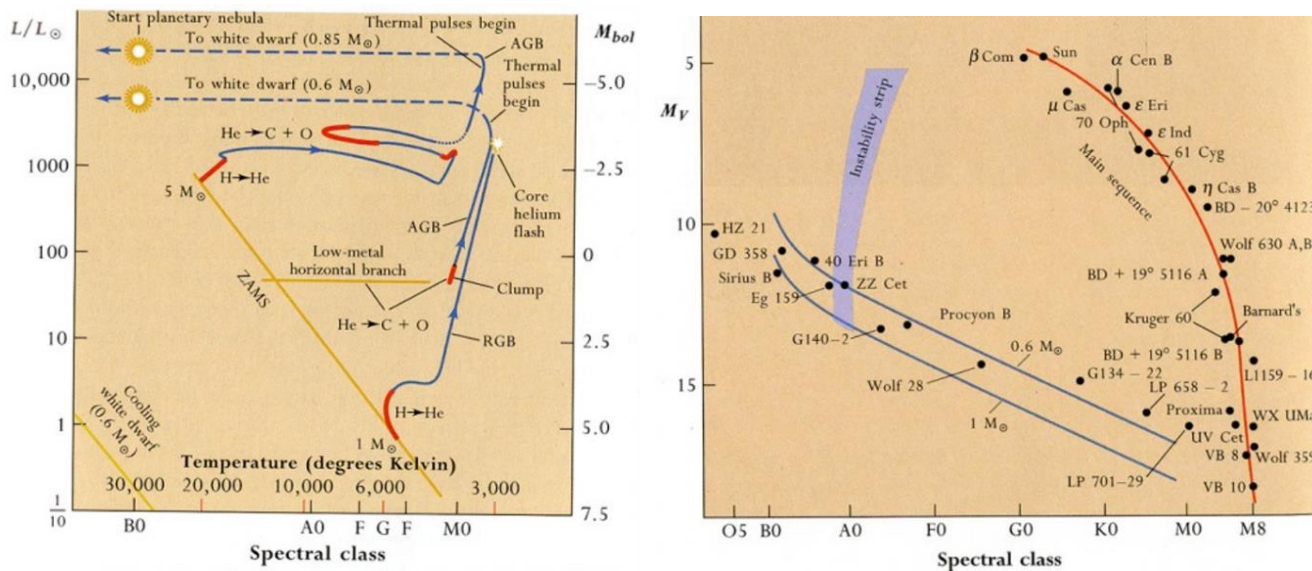


Рис. 9.20. а) эволюция звёзд на главной последовательности, б) последовательность белых карликов и пересекающая её полоса нестабильности

Даже реальные белые карлики, которые мы изучаем, показывают **последовательность белых карликов** (рис. 9.20б). Видно, что полоса нестабильности заходит и в область белых карликов. И действительно, белые карлики типа **ZZ Cet**, когда температура поверхности достигает примерно 10 тыс. К (класс A0), дрожат с очень коротким периодом.

Чем больше плотность тела звезды, тем короче **период её колебаний**. Он всегда очень близок к периоду спутника, обращающегося вокруг массивного тела, потому что это тоже процесс свободного падения вещества. Орбитальный период с первой космической скоростью:

$$P = 2\pi \left( \frac{R^3}{GM} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$\frac{M}{R^3}$  – это плотность, значит, орбитальный период тела обратно пропорционален его средней плотности:

$$P \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Соответственно, любое тело имеет **собственный резонансный период колебаний**, обратно пропорциональный его средней плотности. У белых карликов он минуты, а у самых плотных из них секунды.

На рис. 9.21 представлены типичные **белые карлики и их параметры**. Как правило, их массы 0,5–1 масса Солнца.

Звезда	Прямое восхождение $\alpha$	Склонение $\delta$	Расстояние, пс	Абсолютная звездная величина, m	Масса, $M_{\odot}$	Радиус, $R_{\odot}$
Ван Маанена	00 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup>	+ 5° 10'	4,22	14,24	0,630	0,012
L870-2	01 35	- 5 14	15,38	11,81	0,691	0,013
40 Eri B	04 13	- 7 44	4,98	11,01	0,363	0,017
Сириус B	06 43	- 16 39	2,66	11,30	0,977	0,025
He 3 398	06 44	+ 37 36	16,39	10,95	0,501	0,015
Процион B	07 37	+ 5 22	3,44	13,10	0,426	0,013
L532-81	08 40	- 32 47	9,71	11,90	0,631	0,011
R627	11 22	+ 21 39	12,35	13,80	0,661	0,010
L770-3	16 15	- 15 28		10,00	0,479	0,014
W1346	20 32	+ 24 53	13,89	10,80	0,398	0,016
L1512-34B	23 44	+ 32 15	20,41	11,30	0,813	0,013

Рис. 9.21. Параметры белых карликов

**Белый карлик** не может иметь **массу** более 1,5 масс Солнца. У него нет внутренних источников энергии, он на собственном давлении вырожденного газа находит состояние равновесия, так же как любая планета (рис. 9.22а). У планет типа

Земли или малых тел вроде Луны гравитация хочет сжать планету, и ей противодействует электростатическая (Ван-дер-Ваальсова) сила. С добавлением массы на планету её размер растёт, данная сила побеждает гравитацию, однако но при массе чуть больше массы Юпитера планета начнёт сжиматься, внутреннее давление уступает гравитации.

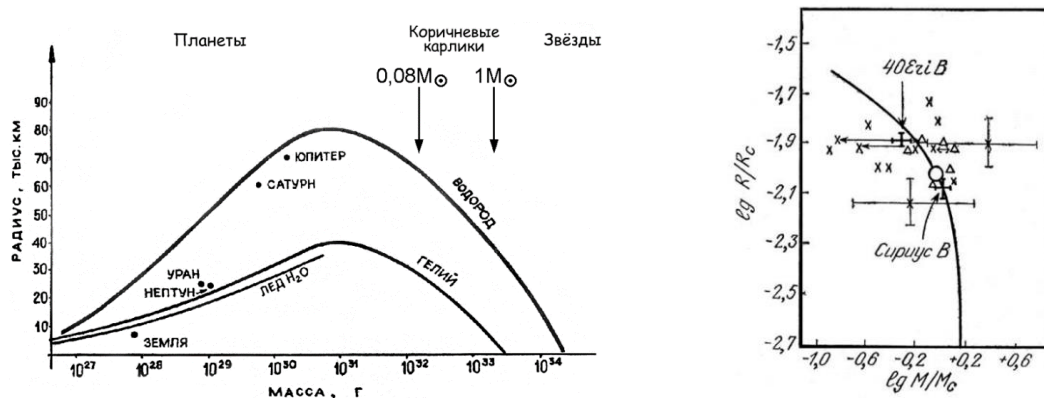


Рис. 9.22. а) зависимость радиуса от массы для звёзд, планет и коричневых карликов, б) связь массы и размера для белых карликов

Таким образом, белый карлик с массой порядка массы Солнца имеет **размер**, сравнимый с размером Земли, а при дальнейшем добавлении массы становится меньше Земли.

На рис. 9.22б точность измерений не очень большая, но видна **связь массы и размера для белых карликов**.

На рис. 9.23а показаны **Сириус А и Сириус В**. При примерно одинаковой массе размер и светимость у них сильно различаются.

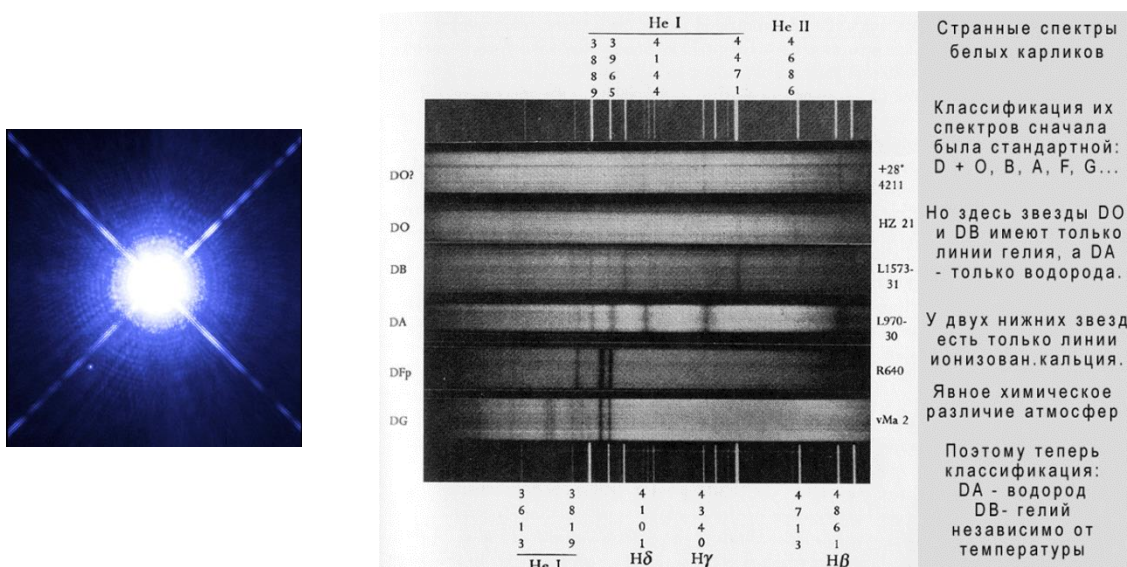


Рис. 9.23. а) Сириус А и Сириус В, б) спектры белых карликов



**Спектры белых карликов** очень своеобразные (рис. 9.23б). Атмосфера плотная, поэтому спектральные линии широкие. У них обычно спектральные классы обозначаются D, а дальше название химического элемента.

Кривая на рис. 9.24 демонстрирует **зависимость массы тела от размера для более широкого диапазона масс**. Маломассивные тела типа Земли имеют небольшой размер, после Юпитера при добавлении массы холодное тело сжимается, и в какой-то момент оно станет очень маленьким, но потеряет равновесие. До этого в белом карлике гравитации сопротивлялись вырожденные электроны. Дальше оно снова будет сжиматься, падать внутрь себя, пока его сжатие не остановят вырожденные нейтроны. Они тяжёлые, поэтому быстро двигаются и сопротивляются сжатию только при очень большой плотности. Получается **нейтронная звезда**, размер которой в тысячи раз меньше размера белого карлика, то есть десятки и даже единицы километров.

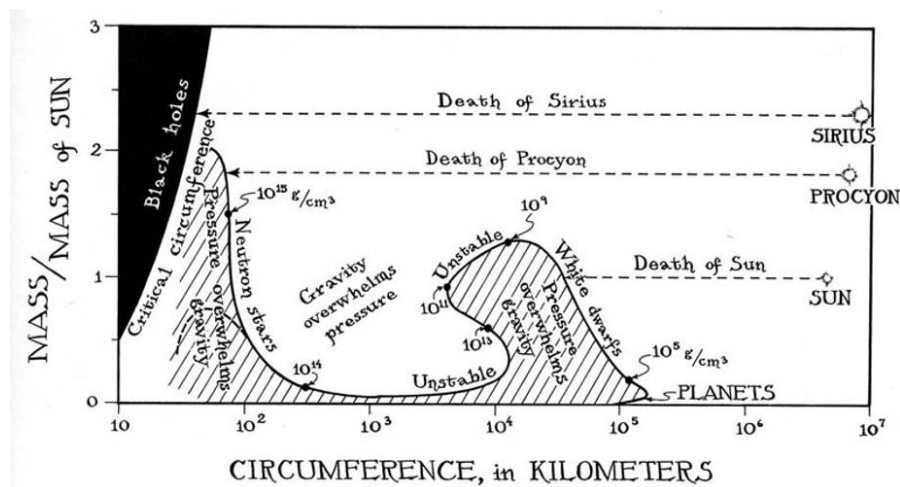


Рис. 9.24. Зависимость массы тела от размера для более широкого диапазона масс

На рис. 9.25 продемонстрирована **общая картина эволюции звёзд**. Звезда образуется из газа. Если она **маломассивная**, живёт, в конце жизни расширяется, сбрасывает оболочку в виде планетарной туманности, и остаётся **белый карлик**.

А если звезда **массивная**, то живёт на главной последовательности, превращается в красный сверхгигант (физика как у гиганта, но размер и светимость больше), дальше взрывообразно сбрасывает оболочку. Так происходит, потому что в такой массивной звезде сначала вырастает внутри белый карлик, на нём накапливается масса, и он коллапсирует, сжимается в нейтронную звезду. При таком сжатии гигантская гравитационная энергия должна выделиться в тепло, плюс к этому добавляют энергию термоядерные реакции, и случается гравитационно-термоядерный взрыв внутри довольно плотной массивной звезды. Её внешняя часть разбрасывается, ядро остаётся.

Если ядро не очень массивное, оно остаётся в форме **нейтронной звезды**. А если более массивное, чем 3 – 3,5 массы Солнца, скорее всего, превратится в **чёрную дыру**. На рисунке она с аккреционным диском, потому что без него изображать нечего.

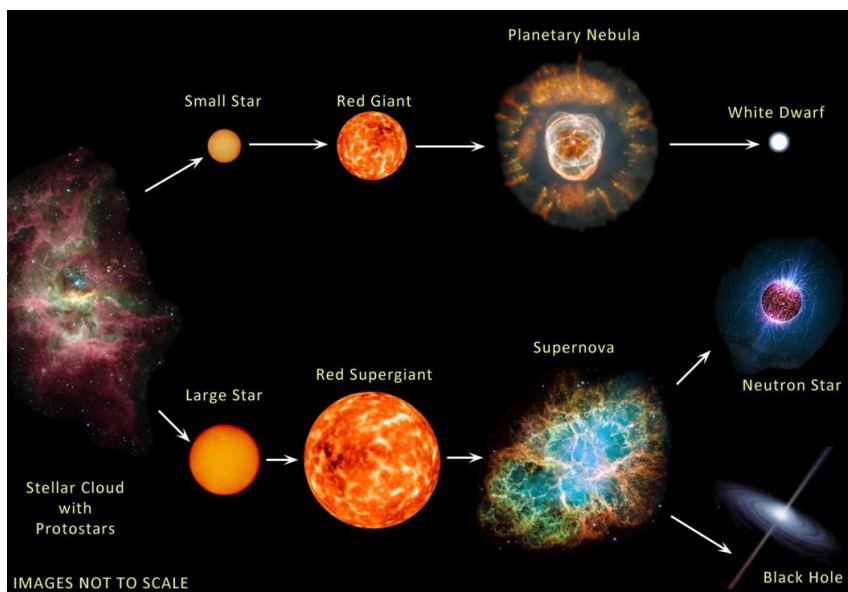


Рис. 9.25. Эволюция маломассивных и массивных звёзд

Рассмотрим **характерные массы** (рис. 9.26). Звёзды с массой до **8 масс Солнца** превращаются в планетарную туманность, а дальше в белый карлик. Для звёзд массой 8–10 масс Солнца дальнейший путь – вспышка, взрыв ядра массивной звезды, сверхновая, и дальше получается нейтронная звезда.

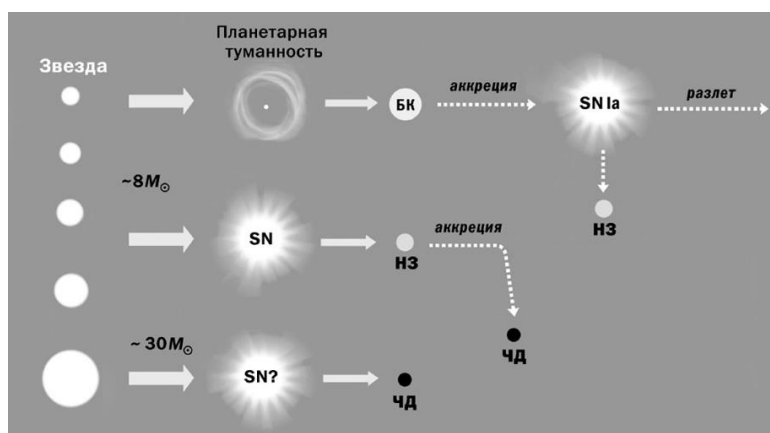


Рис. 9.26. Конечные стадии эволюции звёзд разной массы

Если **белый карлик** одиночный, с ним ничего не будет происходить. Если рядом есть источник вещества, с помощью аккреции на него упадёт много вещества, в процессе будут вспышки новых звёзд, а потом, когда он станет массивным, он сколлапсирует и произойдёт вспышка сверхновой, которая либо разрушит его, либо даст нейтронную звезду.

Если на **нейтронную звезду** что-то будет падать снаружи, она может превратиться в чёрную дыру.

Если рассматриваем путь **очень массивной звезды** (больше 30 масс Солнца), она проскакивает ситуации белого карлика и нейтронной звезды и сразу превращается в чёрную дыру.

**Строение нейтронных звёзд** – сложная проблема, потому что бы не знаем, как ведёт себя вещество при таких высокой плотности. В лаборатории пока нет возможности узнать, как давление и плотность зависят от температуры такого тела, то есть получить уравнение состояния. В ядрах атомов протоны и нейтроны упакованы до таких плотностей, но у них слишком маленькие размеры, то есть гравитация вообще не сказывается, а в нейтронной звезде она есть.

Поэтому **расчёты** не очень надёжные. Про верхние слои ещё что-то понятно – внешняя кора твёрдая, за ней сверхтекучая полужидкая. А в недрах нейтронной звезды протоны и нейтроны могут терять индивидуальность и размазываться до состояния кваркового моря.

Поэтому **модели** внутреннего строения нейтронных звёзд ещё не очень однозначные. На рис. 9.27 для одной и той же массы тела представлено три разных варианта **размера и внутреннего строения** нейтронной звезды. Внизу не очень упругое вещество, и тело сильно сжалось. Слева наиболее упругий вариант, нейтронная звезда получается не такая компактная.

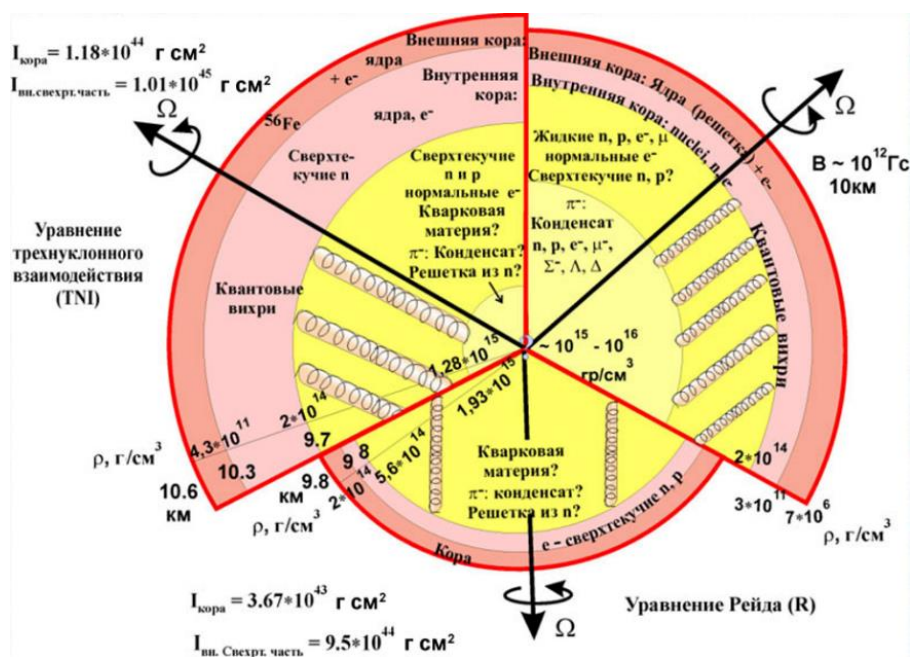


Рис. 9.27. Модели внутреннего строения нейтронной звезды

Последний вариант сжатия звезды – **чёрная дыра**. Ещё с 17 в. существовала идея, что могут быть невидимые звёзды, потому что скорость света конечна, а массивные тела могут иметь у своей поверхности вторую космическую скорость, большую скорости света. Значит, даже квант света не сможет улететь с их поверхности.

В начале 1916 г. был опубликован первый вариант **теории относительности**. Первым решение уравнения общей теории относительности нашёл сам А. Эйнштейн, но только для случая движения лёгкой точки вокруг массивного тела, причём вдали от этого тела. С помощью этого он объяснил, почему у Меркурия такая орбита.

А второе, **сферически симметричное решение** нашёл К. Шварцшильд. Оказалось, что вокруг точечной бесконечно маленькой массы существует два характерных расстояния (рис. 9.28). **Внешняя фотонная сфера** – это то расстояние, на котором, если пустить луч света перпендикулярно к радиус-вектору, гравитация его завернёт, и он будет летать вокруг этой массы. То есть это расстояние первой космической скорости, равной скорости света. А более **внутренняя сфера** – расстояние второй космической скорости, если она выбрана как скорость света. То есть, стартуя с данной сферы, квант ещё может улететь, а из неё ему уже не хватит энергии.



Рис. 9.28. Горизонт событий чёрной дыры и его радиус

Интересно, что в рамках ньютоновой физики получился тот же результат. Можно записать кинетическую энергию тела, движущегося со скоростью света, и приравнять к гравитационной энергии связи на данном расстоянии:

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

Отсюда

$$R_g = \frac{2GM}{c^2},$$

где  $M$  – масса внутренней массивной точки.

Это расстояние называют **радиусом Шварцшильда** или **гравитационным радиусом**. В рамках общей теории относительности тоже при таком расстоянии и массе точки из сферы нельзя улететь даже со скоростью света.

Однако теория относительности демонстрирует более информативное решение. Снаружи и внутри внутренней сферы, называемой **горизонтом событий**, время и расстояние ведут себя по-разному. Внутри переменные меняются местами, и расстояние (радиальная координата) ведёт себя как время, то есть должна непрерывно уменьшаться. Значит, при попадании внутрь сферы можно только падать по радиусу в центр.

Решение было найдено, но тогда ещё было неизвестно, существуют ли в природе такие тела. Если подставить в формулу массу Солнца, радиус получится 3 км. Но потом такие объекты нашли. Термин «чёрная дыра» ввёл в 1965 г. Дж. Уилер.

Теперь мы понимаем, что и к нейтронным звёздам, и к чёрным дырам можно прийти **разными путями**. Можно, постепенно накапливая вещество на белом карлике, заставить его сжаться (рис. 9.29, слева). А можно вырастить в недрах массивной звезды белый карлик, который пролетит устойчивое состояние нейтронной звезды и закончит сжатие чёрной дырой (рис. 9.29, справа).

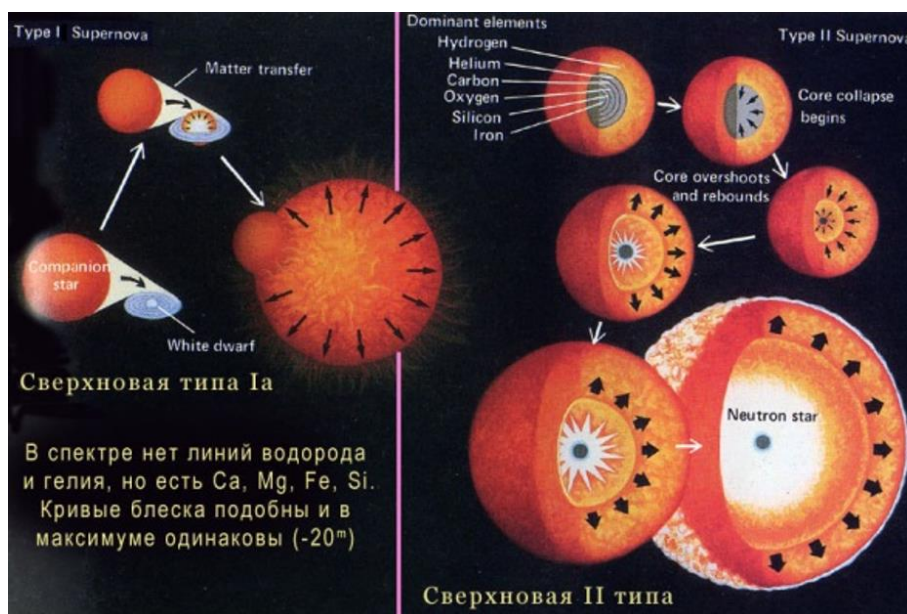


Рис. 9.29. Два пути получения нейтронной звезды или чёрной дыры

Могут быть и другие варианты, но гораздо реже. Рассмотрим **слияние двух релятивистских звёзд** и превращение в следующий этап (рис. 9.30). Например, два белых карлика движутся на общей орбите. Гравитационные волны уносят энергию, размер орбиты сокращается, потом звёзды приходят в контакт, сливаются, и их суммарная масса превосходит критическую. Тогда они быстро сжимаются до состояния нейтронной звезды, но если их изначальные массы были по 1,5 массы Солнца, то могут превратиться в чёрную дыру.



Рис. 9.30. Слияние белых карликов

Взрывы сверхновых, то есть взрывы, целиком разрушающие звезду, делятся на два типа (рис. 9.31). **Сверхновые первого типа** – когда звезда, почти не имеющая водорода, взрывается и в спектре этого взрыва не видно или почти не видно линий

водорода, то есть там взрываются тяжёлые элементы типа азота, кислорода, углерода. А **сверхновые второго типа** – когда взрыв происходит внутри массивной звезды, выбрасывается горячая оболочка, состоящая почти из чистого водорода, и в спектре видны линии водорода. Это говорит о предшественнике и о механизме взрыва.

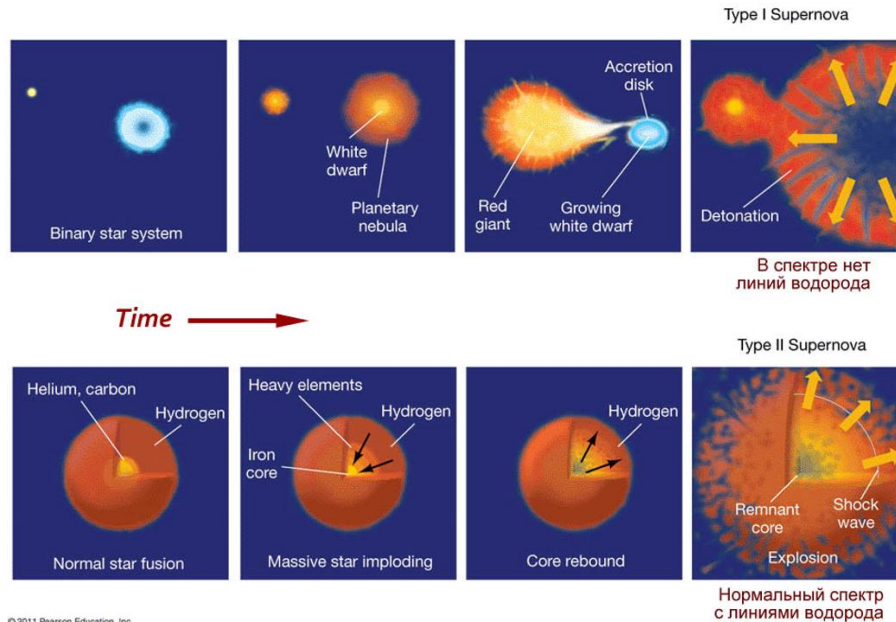


Рис. 9.43. Сверхновые первого и второго типа

В ближайшую тысячу лет ожидается **взрыва звезды Бетельгейзе** ( $\alpha$  Ориона). На рис. 9.32а показано, как выглядит красный гигант в преддверии взрыва. Это модель, но примерно также мы сегодня видим Бетельгейзе. В её ядре цепочка термоядерных реакций уже подходит к железу, но некоторое время они ещё будут продолжаться.

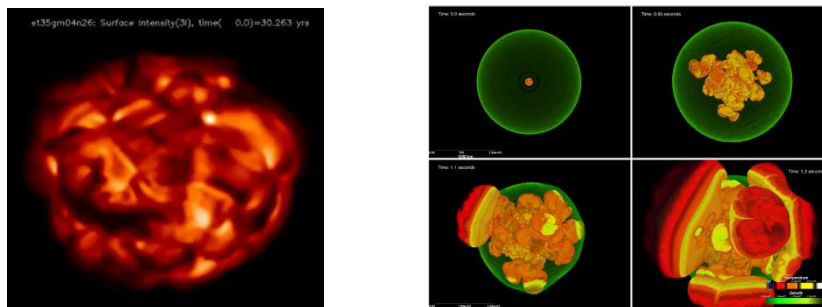


Рис. 9.32. а) красный гигант перед взрывом, б) моделирование взрыва

Но есть **математические гидродинамические 3D модели** этого взрыва (рис. 9.32б). Всегда моделируется только плотное ядро массивной звезды, потому что вокруг него обширная, но очень разреженная оболочка, которая инертна. Она не принимает участие во взрыве, её им просто сбрасывает.

Модели показывают, что **взрыв не симметричен**. Если исходное тело было даже с небольшими вариациями плотности, развитие взрыва усиливает различия плотности в разных частях взрывающегося ядра.

Энергия при взрыве уходит туда, куда падает градиент плотности. Вещество с этой стороны выплёскивается на поверхность ядра, немного остывает. Давление и температура уже не такие большие, поэтому гравитация останавливает вещество, и оно начинает обтекать плотное ядро. Это происходит более-менее симметрично, поэтому вещество в итоге собирается в точке, противоположной месту взрыва, уплотняется. Когда ударная волна схлопывается, она подогревает менее плотные слои звезды.

Нам бы хотелось, чтобы сверхновые звёзды взрывались симметрично. Тогда они с каждой стороны будут иметь одинаковый блеск и смогут работать хорошим индикатором расстояния. Но в природе это происходит не совсем так.

Блеск от взрыва Бетельгейзе будет как у 10 полных Лун. Пока момент взрыва предсказать нельзя, идущий от звезды **поток нейтрино** ещё слабават. Но за несколько часов до взрыва термоядерные реакции уже будут настолько мощными, что оттуда пойдёт такой поток нейтрино, что наши детекторы (на Южном полюсе, подводный на Байкале) уже его заметят. А при самом взрыве поток будет настолько мощным, что некоторые детекторы придётся отключать.

Вспышки сверхновых редко бывают видны глазом, последняя была видна в 1987 г. Она произошла в Большом Магеллановом облаке, в туманности Тарантула её заметил Ян Шелтон (рис. 9.33а).

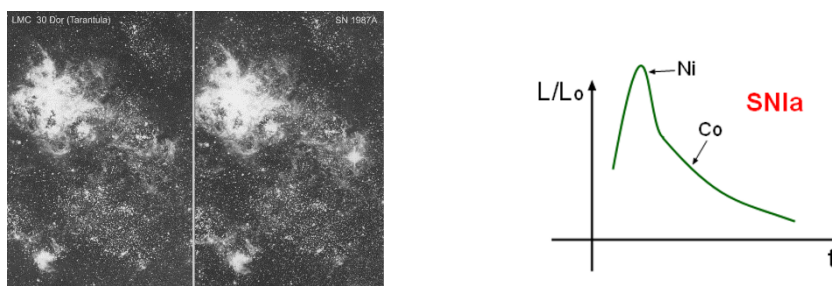


Рис. 9.33. а) SN 1987A в 30 Dor (Tarantula), б) график блеска сверхновой

Для сверхновых характерны **быстрое увеличение блеска** и потом **экспоненциальное спадание**, потому что в момент взрыва синтезируется большое количество радиоактивных элементов (рис. 9.33б). Никель распадается быстро, кобальт чуть медленнее и т. д., получается несколько отрезков экспоненты.

Данный график принадлежит сверхновой первого типа, то есть лишённой водородных линий в спектре. Значит, взорвалось не ядро массивной звезды, а что-то вроде белого карлика или нейтронной звезды. Но здесь, скорее всего, было слияние двух белых карликов (сверхновые типа Ia).

**Вспышка сверхновой** иногда конкурирует по яркости с целой галактикой (рис. 9.34а). На переднем плане звёзды нашей Галактики, а в **M51** мы не видим ни одной одиночной звезды, кроме этой. В данной галактике были взрывы сверхновых в 2005 и 2011 годах, при том, что в нашей Галактике они бывают раз в 50–100 лет.

Обе вспышки произошли в спиральном рукаве, где повышена плотность межзвёздной среды и рождаются звёзды. Наибольшая плотность холодного газа в тёмных прожилках на фотографии, там звёзды формируются. А дальше горячие звёзды в течение жизни перемещаются в более светлое место, нагревают разреженный горячий газ. Массивная звезда не может далеко уйти от места своего формирования, её жизненный цикл 3–5 млн лет при орбитальном периоде 100–200 млн лет. И если звезда в спиральном рукаве, то, скорее всего, это именно **массивная короткоживущая звезда**.

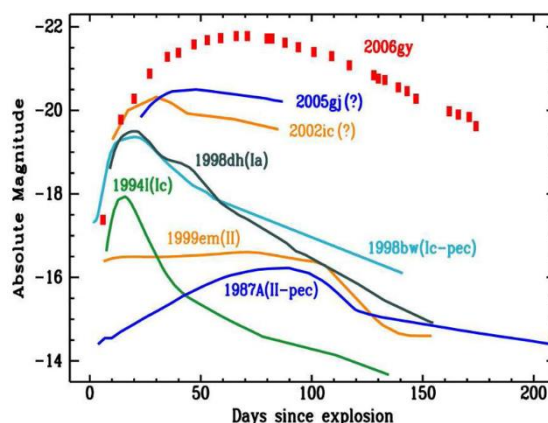


Рис. 9.34. а) вспышки сверхновых в M51 в 2205 и 2011 гг., б) типы сверхновых по кривой блеска

Сверхновые бывают **разных типов по кривой блеска** (рис. 9.34б). Иногда максимальный блеск тянется долго, потом быстро спадает. Бывает быстрый подъём и экспоненциальное спадание. Сама светимость тоже отличается в сотни раз. Далеко не для всех звёзд понятно, что именно в них происходит, причины таких различий изучают.

В **классе** сверхновых **1a** вспышки ведут себя довольно одинаково. Белые карлики взрываются, если их масса переваливает через критическое значение, а оно одно и то же.

Нейтронные звёзды первый раз продемонстрировали себя в виде **радиопульсаров** – быстро вращающихся замагниченных тел, излучающих периодические радиоимпульсы (рис. 9.35). Это явление открыла в 1967 г. Дж. Белл.

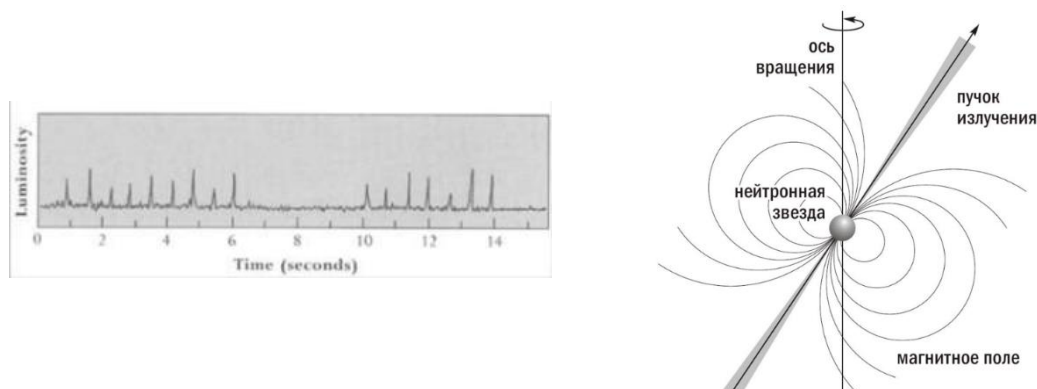


Рис. 9.35. Нейтронные звёзды как радиопульсары



Почему молодые нейтронные звёзды так активно светят в радиодиапазоне, до сих пор не очень понятно. Это быстро вращающееся тело: оно сжималось, поэтому набрало делает десятки и даже сотни оборотов в секунду. У него мощное магнитное поле, но как оно формирует **два мощных радиолуча**, пока исследуется. Когда луч попадает на нас, мы видим яркий радиопоток.

Вообще молодая нейтронная звезда не только радиопульсар, но и оптический, рентгеновский, ультрафиолетовый. На рис. 9.36а показан молодой **пульсар**, звезда взорвалась в Крабовидной туманности 1000 лет назад.

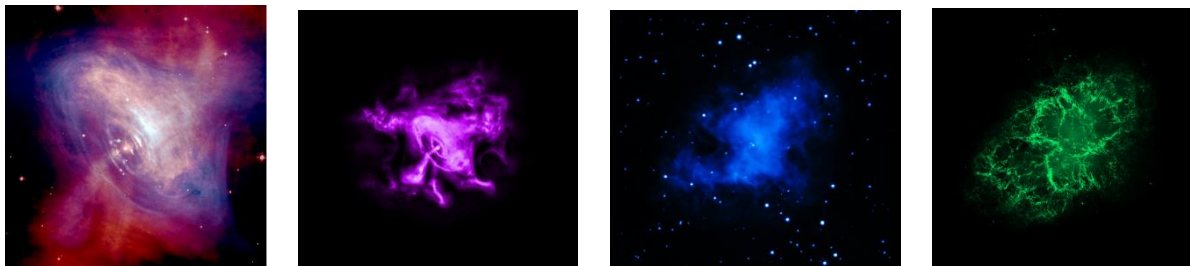


Рис. 9.36. Пульсар  $J0534+2200$  в Крабовидной туманности (а) и его снимки в рентгеновском (б), ультрафиолетовом (в) и оптическом (г) диапазонах

Рис. 9.36б показывает его в **рентгеновском диапазоне**. Хорошо видна нейтронная звезда, очень горячий газ, джеты. На рис. 9.36в пульсар в **ультрафиолетовом** диапазоне. Здесь уже виден окружающий газ, нагретый до высокой температуры. Снимок 9.36г сделан в **оптике**, здесь виден ещё более холодный газ с температурой несколько тысяч кельвинов. Светятся частично возбуждённые атомы вокруг пульсара и нагретого им плотного горячего газа.

Дальше на рис. 9.37а идёт **инфракрасный** диапазон, это уже молекулы и пылинки, ещё более далёкие от жизни пульсара. И на рис. 9.37б **радиодиапазон**. У нейтронной звезды было мощное магнитное поле, и оно тянется довольно далеко. Электроны, наматываясь на магнитные силовые линии, испускают синхротронное излучение. А на рис. 9.37в продемонстрировано **сложение всех диапазонов**, изображённых разными цветами. Однако механизм излучения до сих пор не до конца понятен.



Рис. 9.37. Пульсар в инфракрасном (а) и радио (б) диапазонах, в) сложение всех диапазонов

В жизни нейтронной звезды, если на неё падает окружающий газ, бывает много разных этапов. Когда газа много, он создаёт **капсулу** вокруг нейтронной звезды, и мы часто не видим молодые пульсары, потому что их излучение не может выбраться сквозь горячую плазму (рис. 9.38а).

Дальше аккреционный диск **протыкается** (рис. 9.38б). После этого идёт **взаимодействие магнитного поля с аккреционным диском** (рис. 9.38в).

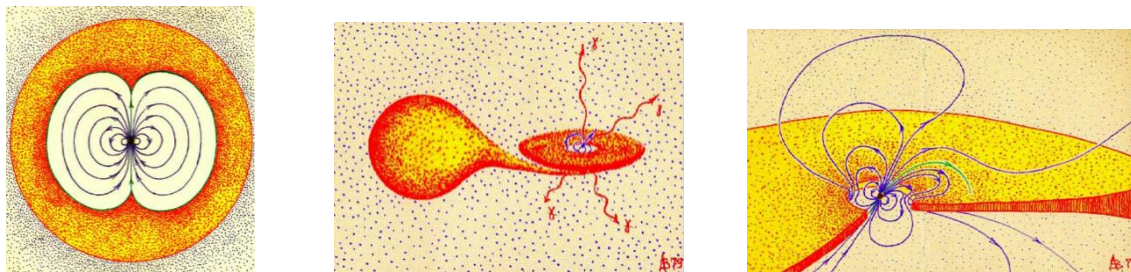


Рис. 9.38. а) молодой пульсар, излучение которого ещё не вышло сквозь диск, б) излучение прошло сквозь аккреционный диск, в) взаимодействие магнитного поля с аккреционным диском

Сначала астрономы выстраивали **пульсары в эволюционную последовательность**. Родился молодой пульсар, он быстро вращается, у него мощное магнитное поле. Затем он ярко светит, зачастую во всех диапазонах. Но термоядерных реакций нет, остывание почти не даёт вклада, магнитное поле и испускание квантов поддерживает только вращение. Значит, по мере старения пульсар должен замедлять вращение, и магнитное поле должно ослабевать. У старых нейтронных звёзд бывают периоды десятки и даже единицы секунд, есть пульсары, которые дают одну вспышку в течение 10 секунд.

Но вдруг были обнаружены **нейтронные звёзды с очень слабым магнитным полем**, явно уже давно затухающим, но вращающиеся с **периодом почти 0,001 с**.

Рассмотрим, откуда старая звезда может взять давно потерянный ею механический момент. Когда рядом с нейтронной звездой есть источник вещества, она будет на себя натягивать аккреционный поток. Газ в диске приближается к звезде и увеличивает скорость движения, около самой звезды она близка к скорости света. И, падая на поверхность, поток газа раскручивает её. Фактически, газ перекачивает орбитальный момент системы в собственный момент вращения нейтронной звезды.

Таким образом, **старая нейтронная звезда раскручивается** и становится похожа на очень молодой пульсар.

С нейтронными звёздами связано довольно странное явление **гамма-всплесков**. Они были обнаружены ещё в начале 1960-х. Эти вспышки иногда бывают настолько мощными, что счётчики на спутниках зашкаливают (через атмосферу они не проходят, с земли их снять невозможно).

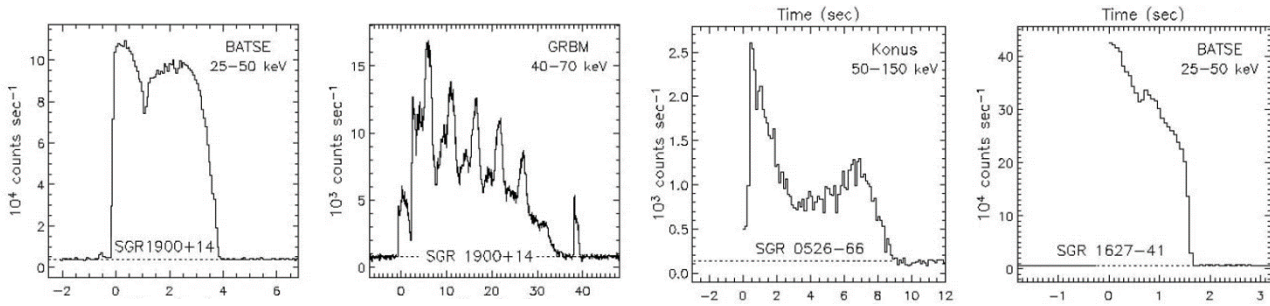


Рис. 9.39. Периодические и непериодические гамма-вспышки

Иногда вспышки рекуррентно повторяются, и видно, что это твёрдый объект, вращающийся с регулярным периодом (рис. 9.39). В других случаях они имеют странную форму.

Сегодня уже понятно, что это тоже связано с нейтронными звёздами. Возможно, здесь, как на Солнце, энергия магнитного поля выплёскивается в виде горячей плазмы, но механизм пока не очень понятен.

И нейтронные звёзды, и чёрные дыры окружены падающим аккрецирующим газом. Если бы у нас были телескопы с высоким угловым разрешением, отличить одно от другого не составляло бы проблемы. Можно было бы рассмотреть внутреннюю часть аккреционного диска (рис. 9.40а). Если в центре чёрная дыра, он подходит к центру гравитации, красное гравитационное смещение начинает ослаблять яркость диска, а дальше начинается сама дыра, то есть вещество туда падает и пропадает. Если в центре нейтронная звезда, красное смещение тоже заметно, но потом газ, падая на поверхность, нагревает её, и она ярко светится.

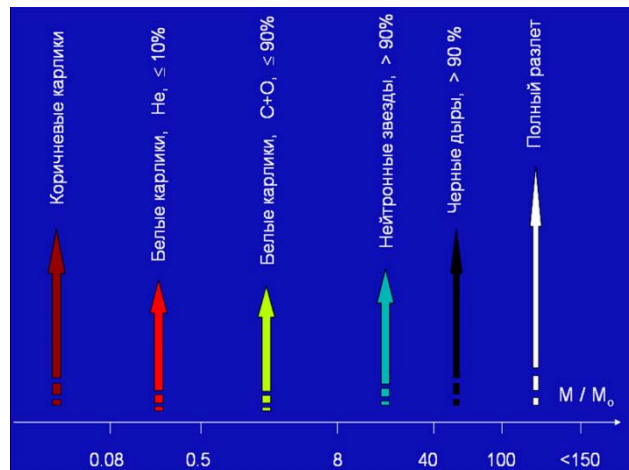
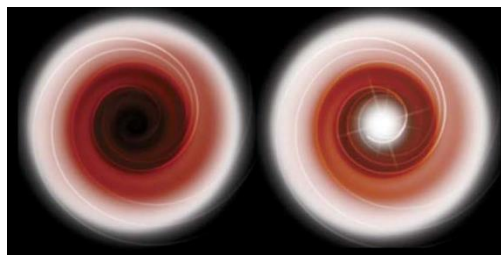


Рис. 9.40. а) отличия чёрной дыры и звезды, б) финальный этап эволюции звёзд разной массы

Но таких телескопов, наверное, никогда не будет, размер чёрных дыр и нейтронных звёзд километры, поэтому то, что перед нами, определяем только косвенно.

Мы уже рассматривали конечный продукт эволюции звёзд разной массы (рис. 9.40б). Есть предположение, что самые массивные звёзды взрываются настолько мощно,

что от них **ничего не остаётся**, то есть ядро разрушает и само себя, и верхнюю оболочку. Но это трудно проверить. Если мы ничего не видим на месте взрыва сверхновой, возможно, не замечаем там чёрную дыру или нейтронную звезду.

В 2011 г. была **гамма-вспышка, которая рекуррентно повторялась** (рис. 9.41а). Навели туда телескоп Хаббл, увидели, что гамма-вспышка произошла из центра галактики, и поняли, что там находится сверхмассивная чёрная дыра. А рекуррентность, скорее всего, связана с тем, что рядом с ней пролетала обычная звезда, с неё приливным эффектом срывало верхние слои, и в итоге от неё ничего не осталось. Это каждый раз добавляло вещество в аккреционный диск, и он демонстрировал большой поток излучения (вспышку) (рис. 9.41б).

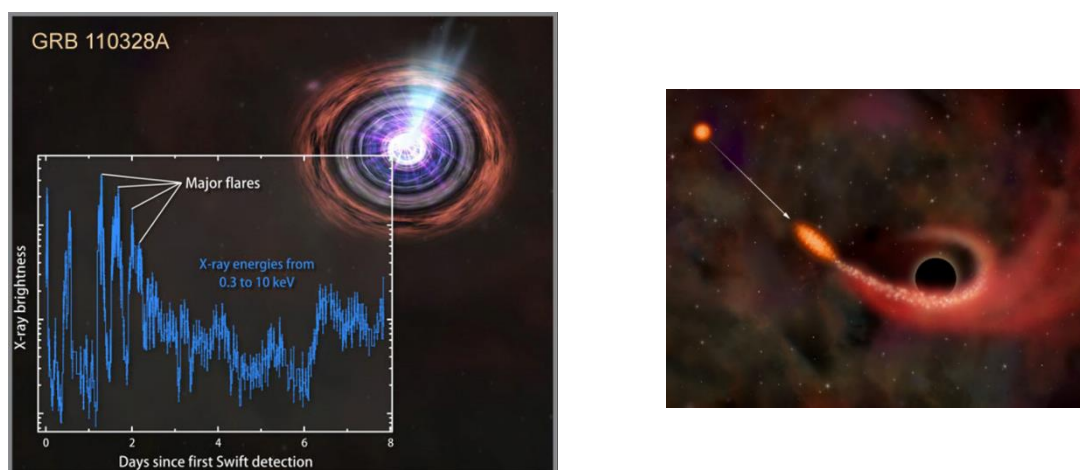


Рис. 9.41. а) Колебания интенсивности рентгеновского излучения GRB 110328A, 2011 г., б) гипотеза физики процесса

В ядрах галактик такое происходит часто. В галактике **M87** в созвездии Девы вылетает джет (рис. 9.42а), и давно было подозрение, что там большая чёрная дыра. В 2019 г. с помощью интерферометра увидели то место, откуда не выходят лучи света, и аккреционный диск (рис. 9.42б). Мы видим и переднюю, и заднюю часть диска, потому что лучи света огибают чёрную дыру. Масса данной чёрной дыры – 6 млрд масс Солнца, и непонятно, из чего она могла сформироваться.

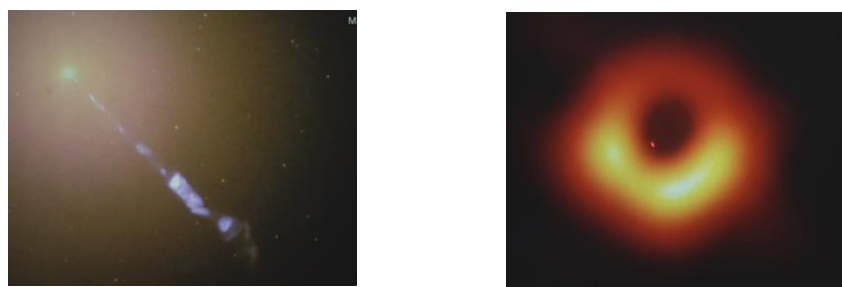


Рис. 9.42. а) джет в галактике M87, б) аккреционный диск вокруг чёрной дыры в M87

## Лекция 10. Галактики

### Млечный Путь

Наша Галактика – **Млечный Путь**. У неё много разных названий, но традиционно её называют просто **Галактикой**. Остальные галактики пишут с маленькой буквы.

Обычно весной Млечный Путь появляется высоко на небе и надолго. Он проходит через созвездия Лебедь, Орёл (рис. 10.1а). Летне-осенний треугольник пересекается с тёмной полосой (дугой), которая прорезает Млечный Путь пополам.



Рис. 10.1. а) Млечный Путь на фоне созвездий, б) полное широкомасштабное изображение Млечного Пути

Полосу Млечного Пути видно и из **Северного полушария**, и из **Южного**. Её никогда не удаётся окинуть взглядом, потому что мешает Земля. На широкомасштабных снимках кажется, что полоса Млечного Пути очень выгнутая. Но этого дуга большого круга, то есть прямая линия на небесной сфере.

Рис. 10.1б показывает **полное изображение Млечного Пути**, т. к. составлен из двух его фотографий – из Северного и Южного полушарий. Но две искажающих сферическую проекцию картинки делают его почти круглым.

Более правильно представить его как на рис. 10.2а, но такой фотографии с Земли не получить. Впервые подобная карта была нарисована астрономами Лундской обсерватории. Они собрали много отдельных фотографий неба и вручную сделали **равноплощадную проекцию** (развёртку глобуса на плоскость), в которой каждая площадка на любой широте имеет одинаковую площадь на сфере. На такой карте нет искажения площадей. Экватор обычно ориентируется вдоль средней линии Млечного Пути.

Сегодня мы имеем возможность изображать такие **карты на компьютере** (рис. 10.2б). Астрометрический телескоп Gaia измерил положение и яркость сотен миллионов звёзд, и когда мы наносим их на экран компьютера, эти звёзды из-за нехватки пикселей сливаются в полосу Млечного Пути, кроме тех немногих, которые расположены за его пределами.

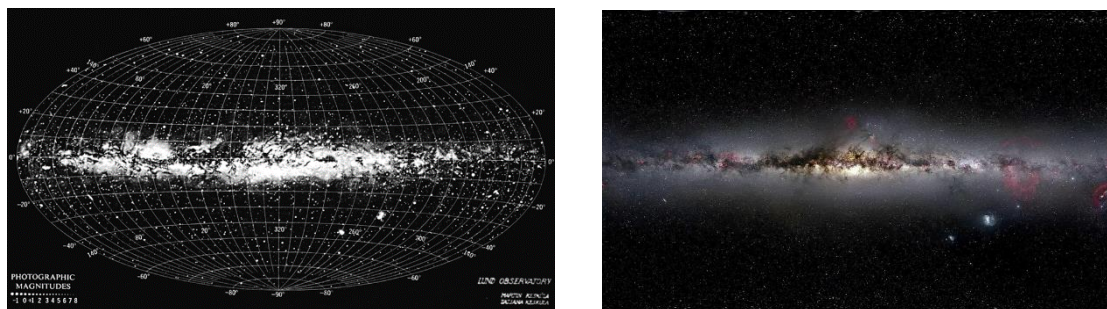


Рис. 10.2. а) рисованная карта Млечного пути, равноплощадная проекция, б) Изображение Млечного Пути, составленное из сотен миллионов отдельных звёзд, Gaia, 2018

Видно, что на центр проецируются тёмные области. Несмотря на отсутствие звёзд в них, мы понимаем, что дыр такой замысловатой формы не бывает, значит, это какие-то **структуры**, которые перекрывают задний фон.

Более **близкие области** мы видим надёжно (рис. 10.3). К счастью, вокруг Солнца на расстоянии примерно 150 пк почти нет межзвёздной среды – газа и пыли. В нашу эпоху Солнечная система пролетает через очень чистое место Галактики – пузырь, который, скорее всего, когда-то был раздут от взрывов сверхновых. На рис. 10.5 представлены ближайшие к Солнцу звёзды.

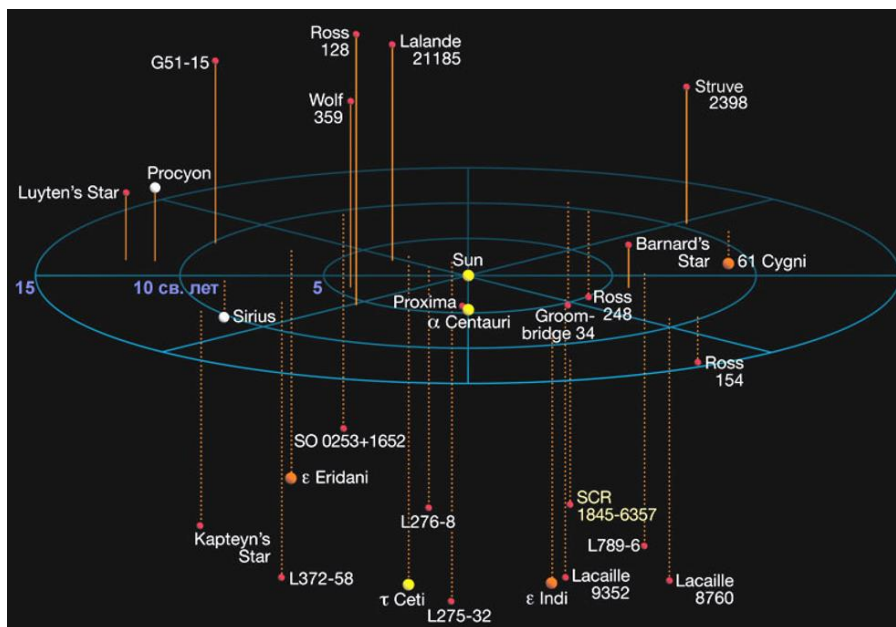


Рис. 10.3. Ближайшие галактические окрестности Солнца

При взгляде вдаль в некоторых направлениях ничего не мешает, а в других видно только звёзды ближнего фона, расположенные до тёмной пыли (рис. 10.4а). Это определяют, потому что их мало и они яркие, а в других областях множество слабых звёзд.

Поэтому **внешний вид Галактики** пока **сфотографировать нельзя**, его можно представить только по рисункам художников (рис. 10.4б). Чтобы получить такую фотографию, надо взлететь над плоскостью Галактики. Солнечная система находится как раз в плоскости Галактики, поэтому Млечный Путь опоясывает наше небо по большому кругу.

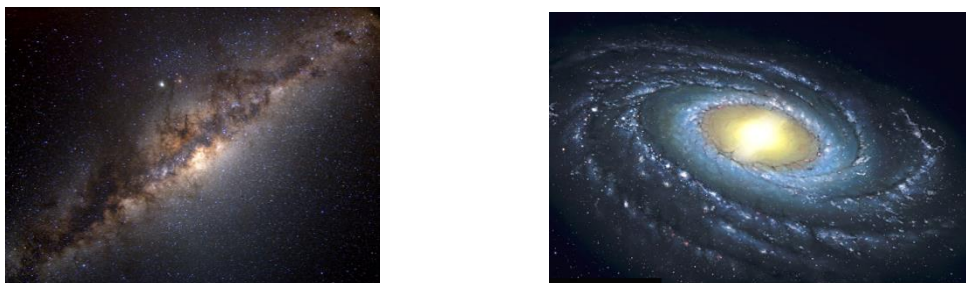


Рис. 10.4. а) Млечный Путь, непрозрачная среда перекрывает луч зрения, б) рисунок художника

Рассмотрим подробнее **причины**, которые **мешают** детально и, главное, однородно, **исследовать Галактику** из места, где мы в ней находимся. Во-первых, **Галактика везде**. Она покрывает  $4\pi$  неба – 41253 кв. градуса, а хорошие современные телескопы не покрывают даже одного градуса. Телескопы с широким полем зрения имеют объектив небольшого диаметра и собирают немного света (рис. 10.5а). Большие телескопы с широким полем зрения сейчас создаются, проект на рис. 10.5б закончат примерно через 1,5 года.

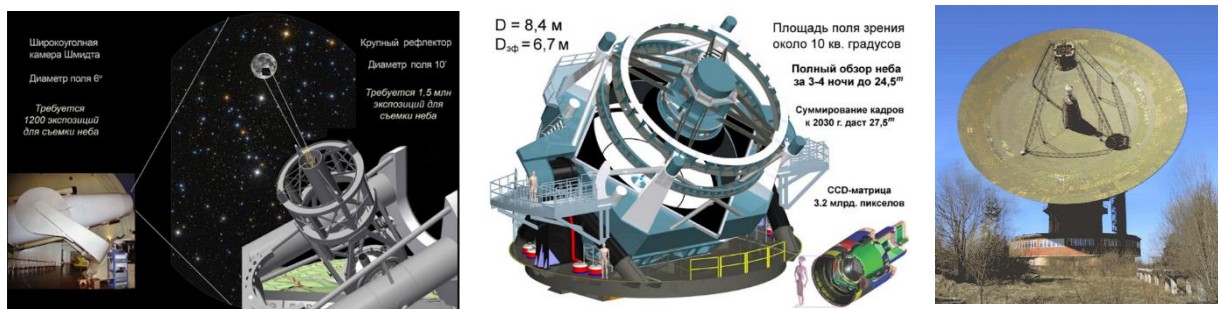


Рис. 10.5. а) широкоугольная камера Шмидта, б) телескоп LSST, в) радиотелескоп

Во-вторых, мы внутри Галактики, значит, можем исследовать рядом с собой даже самые слабо светящиеся звёзды, а чем дальше, тем только более яркие. **Разрыв в расстояниях** между ближайшими светилами и наиболее далёкими (диаметром Галактики) огромный: 1 пк и 100 000 пк. Это сильно затрудняет создание однородного представления о Галактике.

В-третьих, **пылинки**, которые внедрены в межзвёздный газ, **перекрывают свет**. В направлении на центр Галактики в оптике поглощение около 30 звёздных величин. В инфракрасном, радио, а иногда гамма-диапазоне увидеть центр Галактики ещё возможно.

Первым решил изучить Млечный Путь и разобраться в его структуре В. Гершель. Он впервые применил **статистический метод**: выбрал на небе несколько десятков маленьких площадок размером примерно в один градус и стал подсчитывать количество ярких и слабых звёзд в этих направлениях. Он не мог мерить расстояния до звёзд и сделал предположение, что слабая звезда далеко, а яркая близко (в среднем это действительно так).

**Радиодиапазон** намного эффективнее, потому что для радиоволн нет преград. Длина волны в данном диапазоне большая, пылинки маленькие, волна спокойно проходит сквозь них. Но есть недостаток – очень низкое качество изображения, маленькая резкость. Но зато такой телескоп (рис. 10.5в), быстро вращаясь, может быстро пересканировать весь небесный свод.

На рис. 10.6а представлен **обзор неба в оптическом диапазоне**, сделанный телескопом Gaia в 2018 г. Уже вышел его новый обзор, ещё более детальный, хотя на экран детали можно вывести только при рассмотрении отдельных площадок.

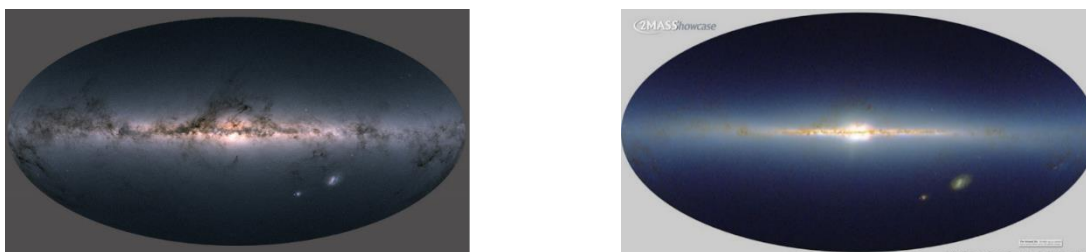


Рис. 10.6. а) равноплощадная проекция Млечного Пути в оптическом диапазоне, Gaia, 2018, б) Млечный Путь в ближнем ИК-диапазоне (1,25 – 2,17 мкм)

Более-менее однородное представление о Галактике дают **инфракрасные обзоры**. На рис. 10.6б представлено небо в ближнем ИК-диапазоне (длина волны 1,25 – 2,17 мкм – средний ИК-диапазон) с Земли. Есть маленькие диапазоны длины волн, на которых атмосфера полупрозрачная. Данный обзор полный – сделан двумя телескопами в двух полушариях. Видно наличие пыли, перекрывающей экваториальную плоскость Галактики, но помех значительно меньше, чем в оптическом диапазоне. Видно центральное сгущение звёзд (галактический балдж), однако там по-прежнему пыль сильно поглощает свет.

Очень полезно снимать одни и те же **области неба на разных длинах волн** и дополнять информацию (рис. 10.7). На **оптической снимке** (верхний правый) видно, что экватор Млечного Пути перекрывает пыль. Переходим в **ближний ИК-диапазон** (верхний левый снимок). В нём можно фотографировать с борта стратосферных обсерваторий и иногда даже с Земли. Пыль ещё заметна, но можно заглянуть более глубоко.

Дальше смотрим в **дальнем инфракрасном диапазоне** (нижний правый). На месте тёмной полосы на предыдущих снимках здесь появилась светлая. Значит, пыль не только перекрывает, но и добавляет излучение, т. к. она нагрета излучением звёзд.



Излучение в данном диапазоне при температуре пыли примерно 100 К. Значит, внутри этого облака находятся молодые звёзды, нагревающие пыль вокруг себя.

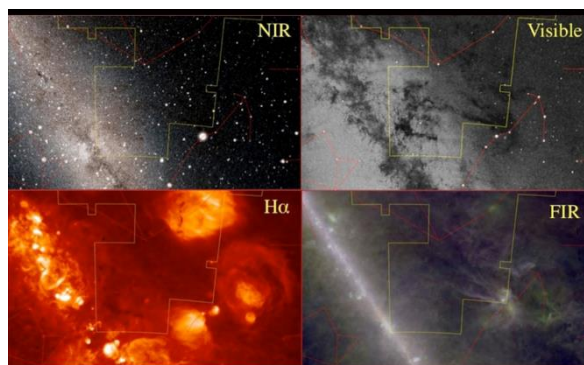


Рис. 10.7. Одна область неба в ближнем инфракрасном, оптическом диапазонах, в спектральных линиях, в дальнем инфракрасном диапазоне

И на нижнем левом рисунке представлен **снимок в спектральных линиях**. Источником линии  $H\alpha$  является водород, излучающий при переходе со второго возбуждённого на первый возбуждённый электронный уровень. Обычно такие снимки в оптическом диапазоне окрашивают красным, потому что сама линия красная. Слева видны яркие источники, значит, там тёплый водород с температурой 2–3 тыс. градусов. Если бы он был горячим, был бы ионизован, и в атоме не было электронов. А если холодным, электроны сидели бы на основном уровне и вообще не излучали. Значит, там область формирования звёзд. В правом облаке они тоже формируются.

Можно сравнить некоторые **радио портреты Галактики** друг с другом (рис. 10.8а). На левой половине тёмная в оптике область содержит холодный газ и пыль, в горячем газе пылинки бы расплавились. Под ним портрет Галактики в широком диапазоне частот в области радиоизлучения. Указана примерная частота, а вокруг неё большой разброс. В радио континууме атомы излучать не могут, у них переходы чёткие – спектральные линии. Зато может излучать хаотическое движение заряженных частиц. Значит, это плазма, в которой движутся электроны. Обычно они навиваются на магнитные линии межзвёздного силового поля. Электроны имеют разную энергию, поэтому излучают в широком диапазоне.

Видно, что в центре изображения много горячего газа, он довольно широко распределён по отношению к экваториальной плоскости Млечного Пути и сосредоточен в центральной части Галактики. Экваториальная плоскость – это наиболее плотная область Галактики, туда притягиваются объекты с севера и с юга, там высокое давление.

Перейдём к другому портрету Галактики, в **линии излучения водорода HI** (верхнее правое изображение). Это атомарный водород, он излучает на длине волны 21 см. Не очень горячий газ прижат к плоскости галактики и более равномерно распределён по всему галактическому диску. На нижнем левом изображении в **линии излучения молекулы CO** видна совсем плоская составляющая, сильно прижатая к галактическому

экватору, где область минимума гравитационного потенциала. Это наиболее холодный газ.

Мы смотрим молекулу CO, а не молекулярного водорода. В природе больше всего водорода, значит, в холодных областях его молекулы должны быть самыми популярными, но их увидеть почти невозможно. Симметричные молекулы очень плохо излучают. У молекул два варианта излучения: они могут колебаться – менять взаимное направление двух своих атомов, или вращаться вокруг двух осей. Но при полной симметрии в каждом варианте как бы заряды ни двигались, перемещения электрического заряда не происходит – он просто симметрично меняет места. Чтобы шла волна, должно быть дипольное разделение зарядов, которого тут нет.

Молекула CO несимметричная, у атомов C и O разная масса, и их колебания приводят к тому, что электрический заряд относительно центра масс молекулы немного смещается, и возникает возможность излучать. Там, где избыток молекул CO, находится и избыток молекулярного водорода, причём его в 100 тыс. раз больше.

Видно, что **разные составляющие** межзвёздной среды **по-разному распределены относительно галактического экватора**, хотя гравитационное поле симметрично относительно направления на север и на юг, и эта симметрия сохраняется. Интересно, что самые горячие и холодные составляющие показывают одинаковое распределение относительно центра Галактики. Так происходит, потому что из холодного газа рождаются звёзды и тут же нагревают этот газ своим излучением.

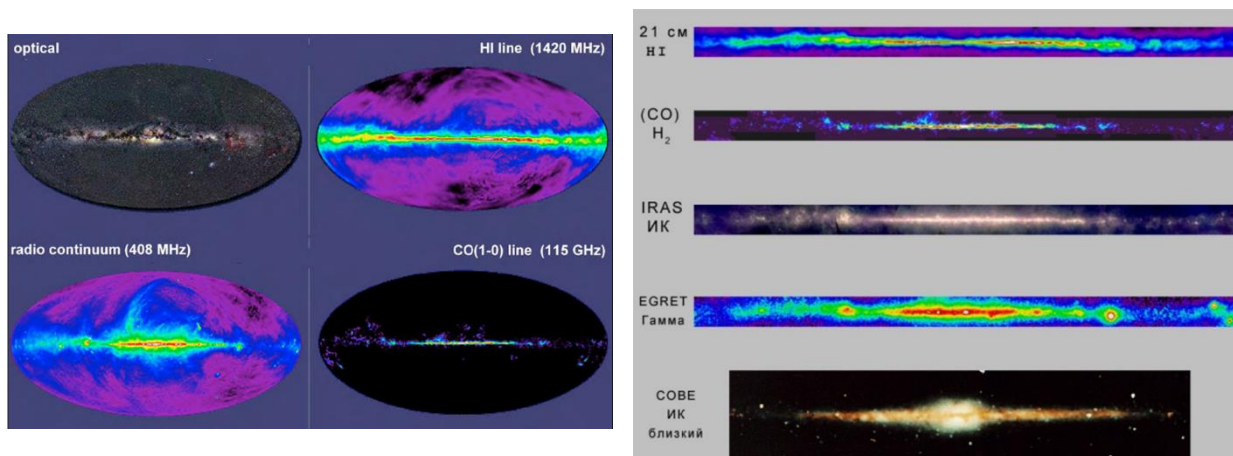


Рис. 10.8. а) портреты Галактики в оптическом, радиодиапазоне, линии излучения HI и CO, б) изображения Млечного Пути в линиях HI, CO, ИК, гамма, ближнем ИК

Можно продемонстрировать множество **портретов Млечного Пути в разных диапазонах волн** (рис. 10.8б).

Из самой холодной межзвёздной среды идёт самое жёсткое **гамма-излучение**. До этого думали, что в данном диапазоне излучает газ с температурой порядка  $10^8$  К. Там происходит сложное взаимодействие взрывающихся звёзд, космических лучей (быстрых протонов) и холодного газа. Сами по себе быстрые протоны не излучают, но, когда

врезаются в холодный газ, рождаются и распадаются  $\pi$ -мезоны, получаются гамма-кванты.

**Дальний инфракрасный** диапазон самый выгодный (нижняя фотография на рис. 10.8б). Он доступен только из космоса, поэтому фотографии в нём делаются со спутников. Здесь звёздная пыль практически незаметна, всё, что светится – звёздное тело Галактики. Земля расположена не в центре Галактики, поэтому мы его видим почти со стороны, и видим там центральную часть диска, а в ней добавленное население высокометаллических старых звёзд (галактический балдж).

На рис. 10.9а представлен **снимок неба в жёстком гамма-диапазоне**. Такие кванты были однородно изучены по небу сравнительно недавно, несколько лет назад был запущен спутник «Ферми». На снимке виден Млечный Путь, а также очень далёкие галактики с активными ядрами, где сидят массивные чёрные дыры.



Рис. 10.9. а) обзор неба в гамма-диапазоне ( $>100$  МэВ), б) обзор, с которого убрали всё известное излучение

Млечный Путь неоднороден, на карте в гамма-диапазоне видны отдельные объекты. Это молодые нейтронные звёзды. Они недавно образовались при взрывах сверхновых и будут некоторое время будут активно излучать во всех диапазонах, в том числе и в этом.

Мы понимаем происхождение **большой части** данного излучения. Можно всё это **снять** с карты и посмотреть, что останется (рис. 10.9б). Впервые по данным спутника Ферми увидели, что над центром Галактики вздымаются две области – слабые, но очень протяжённые источники гамма-излучения. Очевидно, что там нет отдельных объектов или нейтронных звёзд, но есть горячий газ. Он вздымается в двух направлениях, потому что, если нагреть газ в районе центра Галактики, он сможет только всплыть вверх с двух сторон против силы тяжести. Газ есть везде, значит, находится источник энергии.

До сих пор непонятно, что это за область, наполненная горячим газом. На рис. 10.10 представлено изображение, показывающее, как мы себе представляем эти **два пузыря Ферми**. Пока астрономы их изучают, об их происхождении точных представлений нет.

Пузыри Ферми **изучают** очень интересным способом. Наблюдают очень далёкую галактику с ярким активным ядром – квазар. Его луч проходит через эти пузыри, и на Земле получают спектр какой-то линии. Основная линия принадлежит самому объекту излучения, а рядом два сателлита этой линии с красным и голубым смещением. Ясно,

что пузырь расширяется со скоростью порядка 50 км/с: голубая часть приближается к нам, красная удаляется. Значит, в прошлом эти пузыри были компактнее, и их происхождение связано с центром Галактики.

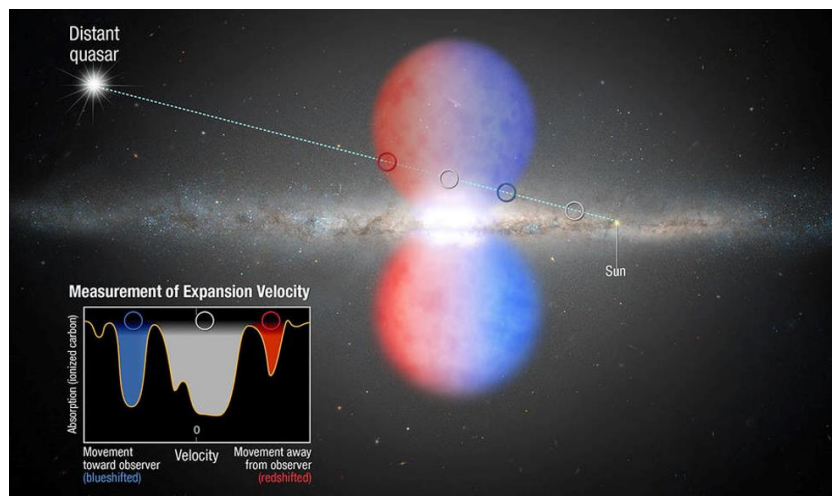


Рис. 10.10. Изучение пузырей Ферми

Вариантов того, что **могло нагреть газ**, много. Во-первых, это **звёзды**. В центральной части Галактики много холодных гигантских молекулярных облаков, в них формируются большие коллективы звёзд. Те звёзды, которые в момент формирования имели большую массу, проживают свою жизнь за несколько миллионов лет и начинают взрываться как сверхновые. Темп рождения звёзд мы примерно знаем, многократных взрывов сверхновых достаточно, чтобы накачать энергию в горячий газ и заставить его подняться наверх.

Однако кроме звёзд там находится ещё и сверхмассивная **чёрная дыра**. Сегодня она тихо себя ведёт, о её наличии можно судить только косвенно по движению звёзд рядом с ней, однако падение газа на чёрную дыру всегда источник энергии. Газ разгоняется, нагревается при сжатии, и начинается мощное излучение.

Возможно, время от времени окрестности чёрной дыры становятся активными, если туда или падает разреженный межзвёздный газ, или приливные силы разрушают слишком близко подошедшую звезду, и она тоже становится источником газа. На какое-то время вокруг чёрной дыры возникает аккреционный диск, нагревается, излучает в обе стороны. Там могут прецессировать горячие струи.

По энергетике проходят оба варианта, верный пока выбрать не удалось.

Если посмотреть на соседние галактики, можно понять, что это **обычное явление**. На рис. 10.11 слева видим **в радиодиапазоне галактику** с ребра, выходящую из её центра струю и две области. Струю, направленную в другую сторону, возможно, что-то поглощает, или её яркость ослабляет доплеровский эффект.

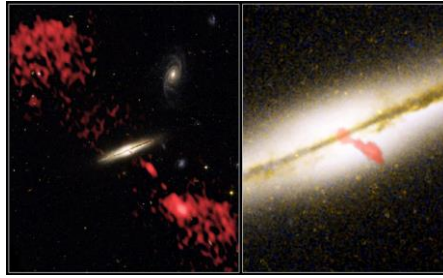


Рис. 10.11. Радиогалактика 0313-192

## Спиральные галактики

Были надежды, что, изучив близкую к нам спиральную галактику **Андромеда**, многое поймём про нашу. Однако её плоскость по отношению к нашему лучу зрения наклонена под углом 15–16 градусов, то есть почти ребром (рис. 10.12а). Мы не можем даже восстановить спиральную структуру, то есть чётко обрисовать ветви.



Рис. 10.12. а) галактика Андромеда, б) галактика, развёрнутая к нам плоскостью

Существуют не очень близкие, но зато **ориентированные почти плоскостью** к нам спиральные галактики (рис. 10.12б). В них можно изучать спиральную структуру и сопоставлять её с нашей, чтобы понять, на какую из них, которые возможно детально излучить, она похожа.

**Общее представление о спиральных галактиках** постепенно меняется. Во многих учебниках спирали рисуют как равномерно раскручивающиеся, иногда даже используют простые математические приближения, например, спираль Архимеда, в которой спиральная ветвь под одним и тем же углом к радиусу, проведённому от центра галактики.

Но если приглядеться внимательно, нигде **нельзя увидеть чётких дуг** «мягкой спирали» на диске спиральной галактики. Можно провести прямые линии, из которых состоит изломанная спираль. Первым на это обратил внимание А. Чернин. Даже гидродинамические модели показали, что это некая неустойчивость спиральной волны плотности, волновое движение на галактическом диске.

Теории, которая объясняет почти прямые линии и внезапные изломы, пока нет. Есть модели, например, **модель вращения тарелки с мелкой водой**, где рождаются спиральные волны плотности. Однако там, в отличие от гидродинамической теории, изломов не получается.

Пусть у нас есть много вариантов спиральной структуры галактик, и мы ходим понять, как со стороны могла бы выглядеть наша. Сначала были **заблуждения**. А. Эддингтон в 1912 г. считал, что Солнечная система находится в центре Галактики (рис. 10.13а), потому что Млечный Путь, если сгладить некоторые тёмные места, имеет однородную яркость по небу.

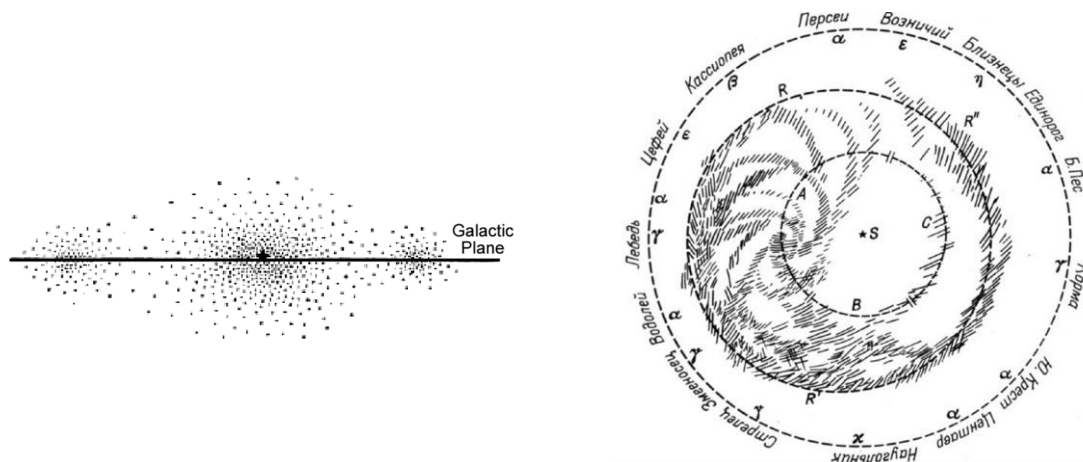


Рис. 10.13. а) ошибочная модель Галактики А. Эддингтона, 1912 г., б) чертёж Галактики Х. Истона, 1900 г.

Но уже в то время другие учёные сомневались в этом. Х. Истон уже в 1900 г. считал, что центр нашей звёздной структуры где-то в другом месте, а **Солнце смещено** относительно него. Он уже рисовал Млечный Путь спиральным (рис. 10.13б). Истон расположил центр Млечного Пути в направлении созвездия Лебедь. Сегодня мы знаем, что на самом деле он в направлении созвездия Стрельца. А Истон считал по-другому, потому что на фоне Млечного Пути в Лебеде самая яркая концентрация звёзд. Так получается, потому что, когда мы смотрим в данном направлении, смотрим вдоль спирального рукава, и в проекции видим много ярких звёзд.

Х. Шепли впервые довольно точно понял **размер Галактики и направление на центр**. Он решил, что не надо смотреть в плоскости Млечного Пути. Наоборот, надо найти направление, в котором пыль не мешает и можно увидеть далёкие объекты, которые, возможно, оконтурят Галактику, покажут её структуру, размер и наше положение относительно её центра.

Для этого он использовал **шаровые звёздные скопления**, которые разбросаны по всему небу. Если нанести их на привычную звёздную карту, мы увидим концентрацию шаровых звёздных скоплений в направлении Стрельца (рис. 10.14). Очевидно, что где-то там лежит главная часть Галактики. Шепли довольно точно указал направление центра.

Потом радиоастрономы его уточнили, нашли там положение очень яркого радиоисточника, практически совпадающего с чёрной дырой. Сегодня мы знаем координаты центра Галактики с точностью до долей секунды.

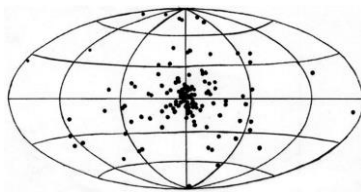


Рис. 10.14. Видимое распределение шаровых скоплений на равноплощадной карте галактики в галактических координатах

Также Шепли измерил расстояние до центра с ошибкой примерно в 30%. Расстояние до шаровых скоплений измеряется неплохо, потому что в них есть цефеиды, у которых известна светимость.

**Пыль мешает видеть** далеко в плоскости Галактики как в направлении центра, так и в направлении антицентра. Зелёная область на рис. 10.15а занимает расстояние 2–2,5 кпк. Но в направлении от полупрозрачного диска к югу и к северу мы видим далеко. Поэтому можно определить расстояние до концентрации шаровых скоплений, которые не в плоскости диска.

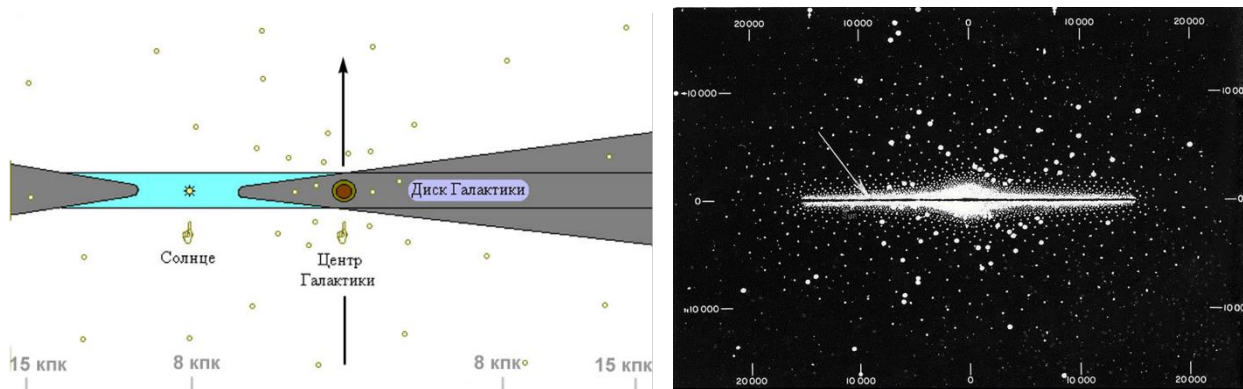


Рис. 10.15. а) область Галактики, доступная наблюдениям в оптическом диапазоне спектра, В. Сурдин, б) Схема Галактики (вид с ребра), отмечено положение Солнца, шкала в кп

Многие десятилетия астрономы считали, что **Солнце находится** на расстоянии 10 кпк от центра Галактики (рис. 10.15б).

Потом это расстояние стали уточнять. Каждая отметка на рис. 10.16а – **новый способ** измерить расстояние до центра Галактики.

При изучении галактики нужно общее представление о масштабах, и МАС (Международный астрономический союз) время от времени публикует рекомендации, каким считать расстоянию до центра Галактики на основе всех предыдущих работ. Ошибки были немалые, но в середине 80-х годов это расстояние снизили до **8,5 кпк**. Но в отдельных работах оно ещё меньше. В последние годы большинство авторов определяет его в пределах 8–8,5 кпк (рис. 10.16б).

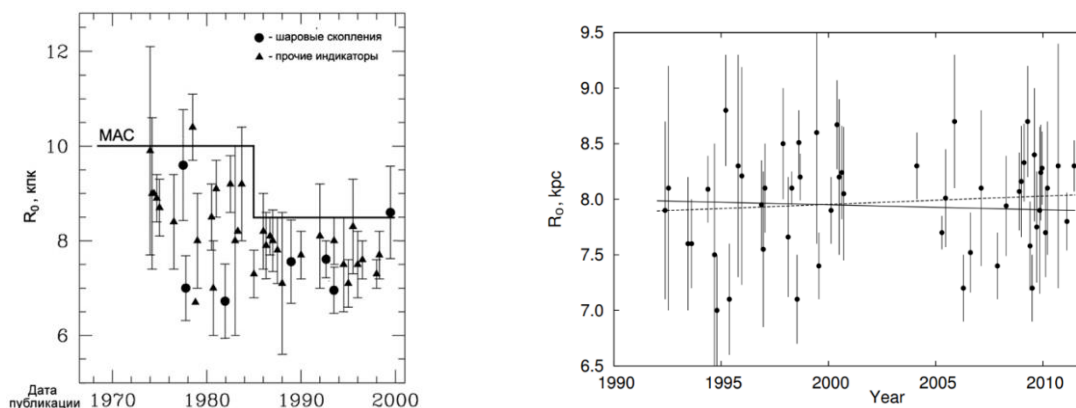


Рис. 10.16. Расстояние от Солнца до центра Галактики, измеренное разными способами

Увидеть что-то **в центре Галактики** сложно даже в дальнем инфракрасном диапазоне. Большую часть там закрывают облака, но **ядро Галактики** уже просматривается (рис. 10.17а).

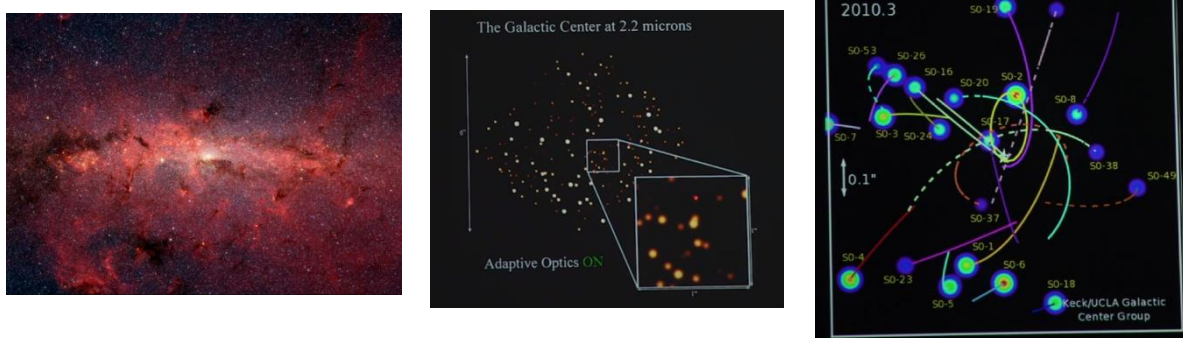


Рис. 10.17. а) ядро Галактики в дальнем ИК, б) окрестность Галактического центра, 2,2 мкм, с использованием адаптивной оптики, в) перемещение отдельных звёзд относительно центра Галактики, б) R. Genzel и A. M. Ghez

Сегодня в этом диапазоне можно рассмотреть окрестность галактического центра (рис. 10.17б). С помощью адаптивной оптики можно увидеть **отдельные положения звёзд** с точностью до одной угловой секунды – красных гигантов и сверхгигантов.

Астрономы следят за их **перемещением относительно центра Галактики** с 1995 г. (рис. 10.17в). Белая звездочка показывает положение центра всех эллиптических орбит данных звёзд. Мы понимаем, что в этом месте сильная гравитация, но никакого объекта там не видим. Из этого можно сделать вывод, что там находится сверхмассивная чёрная дыра.

Осенью 2020 г. после 30 лет работы над данной темой получили Нобелевскую премию R. Genzel и A. M. Ghez.

**Схема Галактики** на сегодняшний день определилась (рис. 10.18). Всё, что мы видим, упаковано примерно в диаметре 30 кпк, то есть 100 тыс. световых лет. Расстояние



от Солнечной системы до центра не сильно отличается от 8 кпк. Основные молодые объекты населяют галактический **диск**: газ сконцентрировался в диске, из него рождаются молодые звёзды и обращаются вокруг центра Галактики.

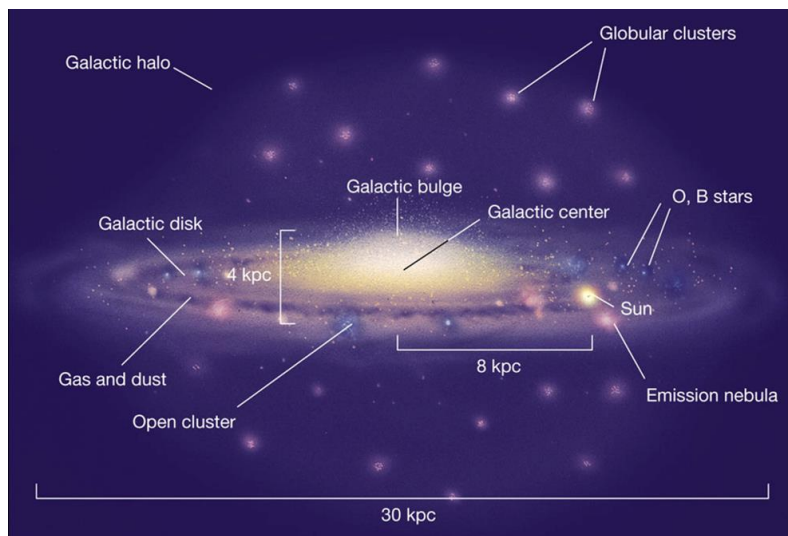


Рис. 10.18. Основные компоненты Галактики

Происхождение концентрации не очень молодых звёзд – галактического **балджа** – пока ещё представляется смутно. Возможно, это самые древние звёзды, или они туда каким-то образом переместились.

Самые старые звёзды населяют галактическое **гало**. Малая часть (примерно сотая доля) их сконцентрирована в **шаровых скоплениях**, но в основном они летают поодиночке, мы их называем **звёздами поля** – одиночные, равномерно рассеянные в пространстве звёзды. Примерно 80% массы звёздного тела Галактики сконцентрировано в диске и в центральной конденсации, а 10–15% рассеяно.

Все эти **звёзды разные**. Звёзды в гало содержат очень мало металлов, то есть тяжёлых элементов, и мы понимаем, что это звёзды предыдущих поколений, когда в межзвёздной среде было ещё мало тяжёлых элементов.

**Положение Солнца по отношению к спиральной структуре** пока непонятно, потому что пока не получается нарисовать достаточно чётко саму структуру. Вроде бы мы находимся во второстепенном ответвлении спирального рукава Персея, плотных конденсаций молодых звёзд рядом с нами нет (рис. 10.19а).

Хотелось бы понять, какая из наблюдаемых рядом с нами галактик напоминает хотя бы общий вид нашей. На рис. 10.19б представлены две галактики, которые мы видим почти плашмя. Существует грубое разделение спиральных галактик на **два типа**.

В М51, начиная от центра, можно на 1,5–2 оборота проследить отдельную спиральную ветвь, то есть в этой галактике есть понятный геометрический рисунок спиральной структуры (**grand design**). Там виден набор прямолинейных отрезков, сложенных в общий рукав.

А бывают галактики другого типа – **flocculent**. В NGC 7793 невозможно проследить хотя бы один спиральный рукав, видны только обрывки дуг, набросанные на диск галактики.

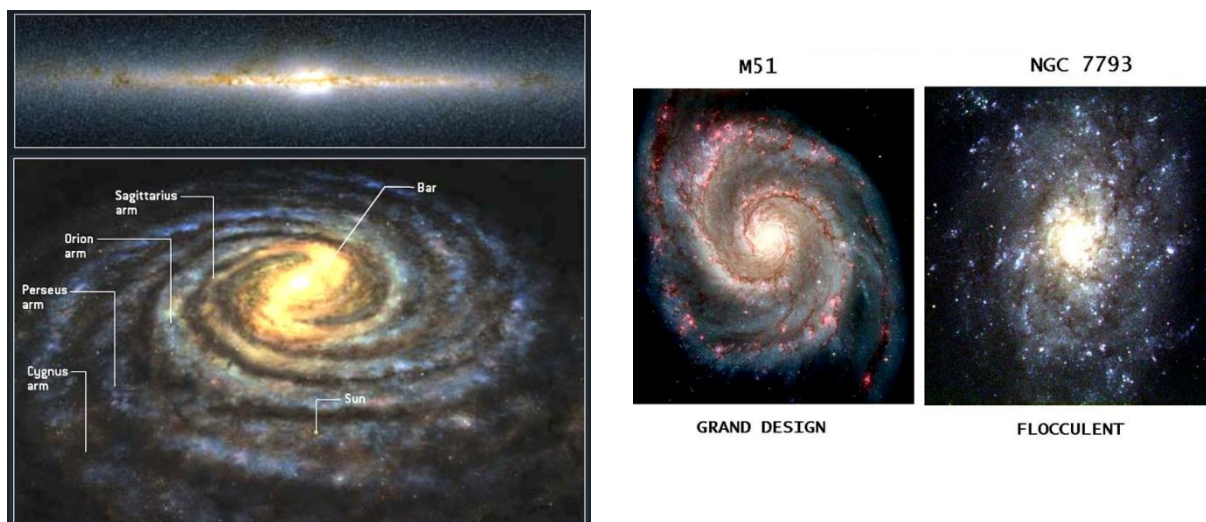


Рис. 10.19. а) положение Солнца в спиральной структуре, б) два типа спиральных галактик

На рис. 10.20а и 10.20б представлены две галактики с grand design, но с разной спиральной картиной. На изображении 10.20а можно проследить спиральную ветвь до самого центра, она выходит из практически точечного ядра, это **нормальная спираль**. А на рисунке 10.20б ветви отходят от концов эллипсоидального сгущения. Такое сгущение обычно называют bar, а саму галактику **пересечённой (барообразной) спиральной**.

У таких галактик может быть разное происхождение и эволюционный статус. Последние модели показывают, что спиральные галактики по мере эволюции **могут переходить** из нормальной в барообразную и обратно.



Рис. 10.20. а) спиральная галактика без бара, б) спиральная галактика с баром, в) рисунок Галактики, 2015 г.

Нашу Галактику астрономы долго считали классической **нормальной спиралью**. Но инфракрасные наблюдения показали, что в её центре есть небольшой бар (примерно 3–4 кпк в диаметре), и уже от его концов начинает раскручиваться спиральная структура. Рис. 10.20в даёт правильное на сегодняшний день представление о Галактике.

Понятно, что геометрия в общем спиральная, но **количество рукавов** по-прежнему **трудно определить**. Белой точкой показано положение Солнца, а белым кругом – та область, которую мы можем более-менее изучить в оптике. Дальше что-то увидеть можно только в инфракрасном диапазоне, где изображения не очень чёткие, а ещё дальше в радиодиапазоне с ещё менее чёткими изображениями.

Вспомним **галактическую систему координат** (рис. 10.21). Её ориентируют относительно Солнца в плоскости Галактики. Направление нуля галактической долготы на центр, и дальше, если смотреть из северного полушария против часовой стрелки, будет увеличение градусов. Четыре области называют квадрантами. Первый, второй и третий квадранты галактических долгот неплохо видны из северного полушария, а четвёртый только из южного, поэтому эта область пока не очень хорошо исследована.

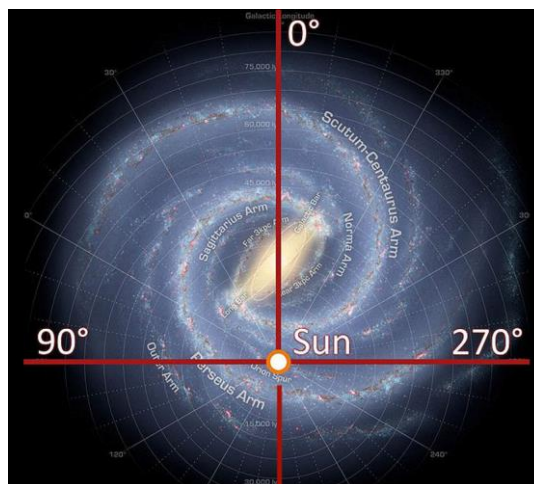


Рис. 10.21. Галактическая система координат

### Вращение галактик

На рис. 10.22а представлено **направление вращения Галактики**. Рукава закручиваются концами против часовой стрелки, а направление движения звёзд по часовой. Такая структура спиральной галактики называется **спиралью с отстающими рукавами**: ближняя к центру часть рукава летит по орбите, а дальняя как бы отстаёт от неё.

На сегодняшний день обнаружено небольшое количество спиральных галактик с **лидирующими рукавами**, когда вперёд уходят дальние концы по вращению. Но большая часть спиральных галактик демонстрирует такую же структуру, как у нас. Пока непонятно, в чём разница в динамике.

**Солнце и его соседи вращаются** вокруг центра в направлении галактической долготы 90 градусов – на созвездие Лебеда.

**Самые старые звёзды** в Галактике находятся в Гало, потому что новые вращаются в межзвёздном диске, где есть межзвёздный газ. В Гало газа нет, значит, находящиеся там звёзды родились давно (рис. 10.22б).

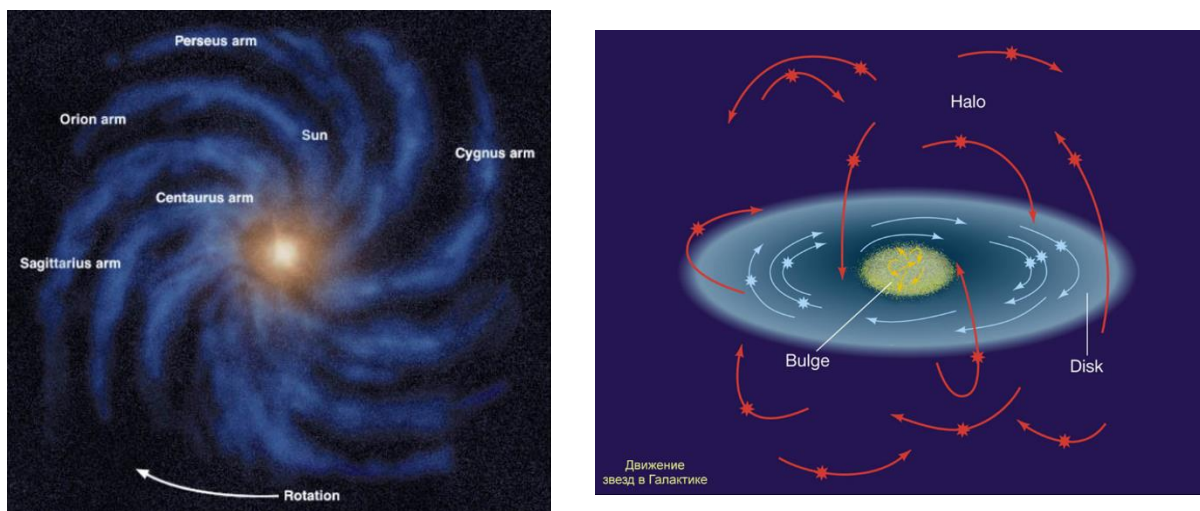


Рис. 10.22. а) вращение Галактики, б) движение звёзд в Галактике

Самое первое поколение звёзд можно **отличить** от современных по **химическому составу**. Каждое новое поколение звёзд нарабатывает тяжёлые элементы, дальше звёзды взрываются, выбрасывают их в межзвёздную среду, и из них формируется новое поколение звёзд, обогащённое тяжёлыми элементами.

На рис. 10.23 представлена **история поиска самых первых звёзд** в нашей Галактике. По оси *x* представлены годы, по оси *y* – химический состав. В данном случае взято отношение количества кальция к водороду, иногда берётся отношение железа к водороду. Квадратные скобки показывают, что это логарифм.

Ноль – это химический состав поверхности Солнца. Звёзд с большим отношением концентраций кальция и водорода почти нет в Галактике, только самые молодые. Дальше содержание тяжёлых элементов в сто, в 10 тыс. раз меньше и т. д.

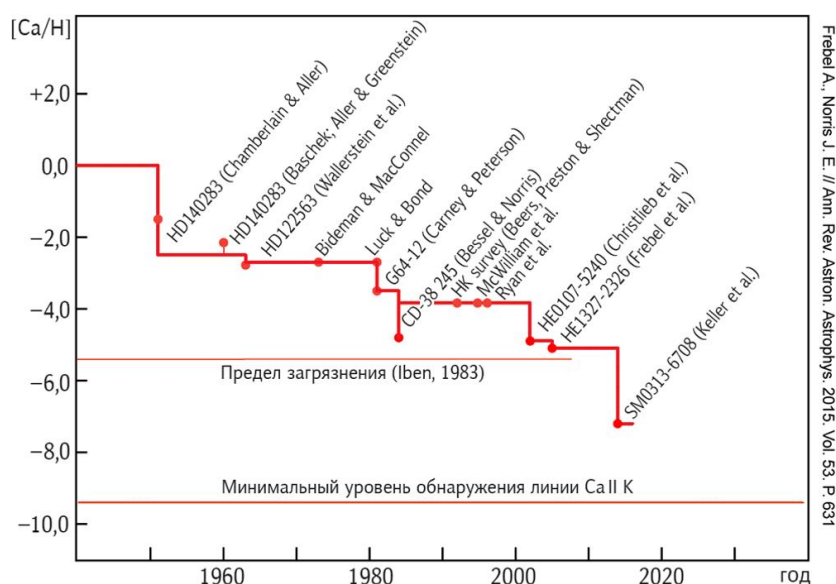


Рис. 10.23. История поиска звёзд Галактики, экстремально бедных металлами

Год за годом находили звёзды с всё более простым химическим составом, то есть водород и гелий в них есть всегда, а тяжёлых элементов всё меньше.

В 1983 г. И. Ибен сказал, что звёзд, содержащих тяжёлых элементов меньше, чем при **пределе загрязнения** (менее одной миллионной по отношению к водороду) нельзя найти, потому что, даже если в звезде при рождении вообще нет тяжёлых элементов, она живёт в окружении современного межзвёздного газа. В течение жизни звезды он нападает на неё и загрязнит её атмосферу.

Однако такую звезду всё равно нашли. А в 2000-х годах В. Г. Сурдин показал, что могут существовать звёзды, содержащие такое маленькое количество тяжёлых элементов, что их в  $10^7$ – $10^8$  раз меньше, чем тяжёлых элементов. Через несколько лет после этого на самом деле нашли звёзды, в которых содержание тяжёлых элементов ниже предела загрязнения. Так происходит, потому что некоторые звёзды сопротивляются падению газа снаружи. Они отталкивают пылинки давлением света и сопротивляются загрязнению.

Ещё на рисунке можно видеть **минимальный уровень обнаружения линий тяжёлых элементов**. Современный спектроскоп не увидит в спектре звезды наличия линий тяжёлых элементов, если их содержание ниже такого уровня.

Измерять движение звёзд в соседних галактиках довольно легко: на них наводится спектроскоп, и по эффекту Доплера измеряется их скорость.

**Вращение диска галактики** тоже измеряется легко. Обычно берут спектроскоп с широкой (длинной) щелью и помещают её вдоль большой оси галактики, особенно если она видна **с ребра** (рис. 10.24). Тогда на одном спектре можно увидеть излучение звёзд из разных частей диска, и становится видно, как длина волны (а значит, и **лучевая скорость**) меняется вдоль большой оси галактики.

Данная галактика в целом удаляется от нас, но на фоне этого движения левая часть удаляется быстрее, а правая медленнее, значит, левая часть движется от нас, а правая к нам, и общее вращение вокруг центра легко измеримо.

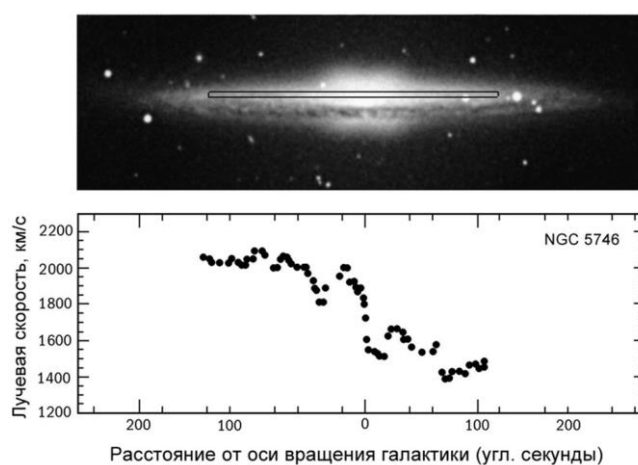


Рис. 10.24. Скорость вращения разных частей галактики

На рис. 10.25а показан результат таких измерений. Падение к нулю – чисто аппаратный эффект, связанный с тем, что, когда спектроскоп смотрит на центральную область галактики, все звёзды движутся перпендикулярно нашему лучу зрения. А дальше представлены реальные скорости вращения галактик вокруг оси. Удивительно, что и для нашей, и для соседних галактик на расстоянии 15–20 кпк от центра скорости звёзд не снижаются.

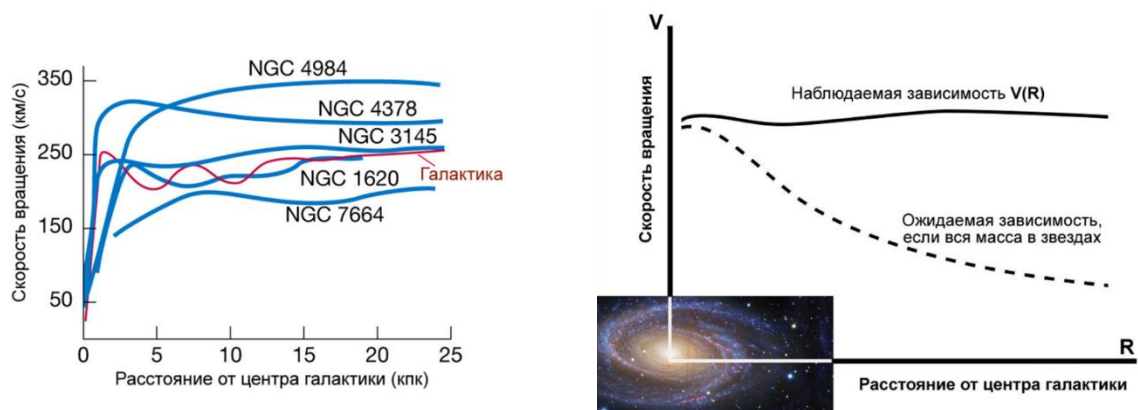


Рис. 10.25. Реальные скорости вращения галактик вокруг оси (а) и ожидаемый результат (б)

А ожидалось, что орбитальные скорости звёзд на периферии будут снижаться (рис. 10.25б). Удаляясь от центра галактики, мы попадаем в почти пустую область, значит, притяжение должно снижаться пропорционально квадрату расстояния.

На рис. 10.26а представлены скорости звёзд уже в нашей Галактике, причём без аппаратного эффекта для центра: там звёзды движутся с той же скоростью 200–220 км/с. При удалении от центра ошибки становятся гораздо больше, но всё равно видно, что скорость вращения звёзд не снижается, а возможно, даже немного повышается.

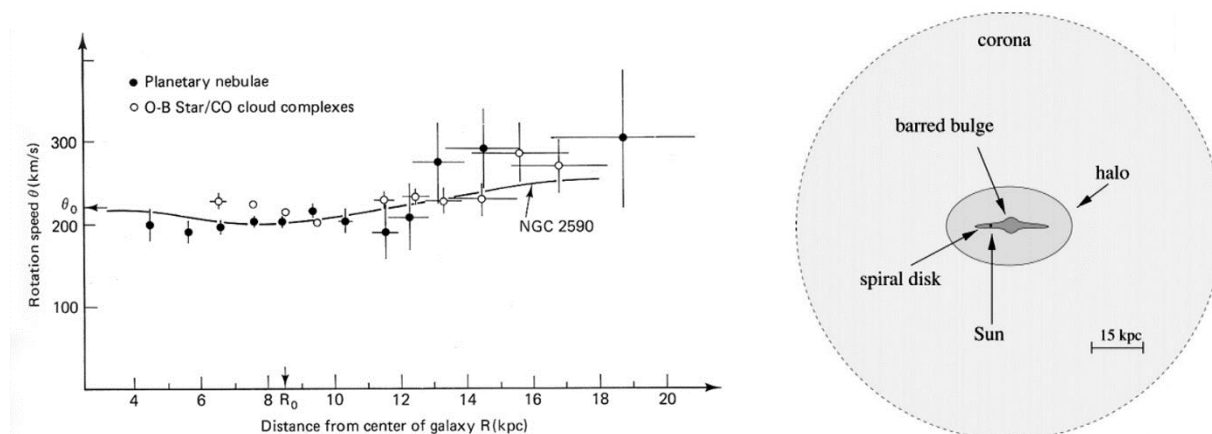


Рис. 10.26. а) кривая вращения Галактики в области  $R > 4$  кпк, б) Сравнение размеров Галактики и тёмной короны вокруг неё

Таким образом, приходим к выводу, что за пределами звёздного тела Галактики и даже за пределами разреженного звёздного гало есть масса какого-то невидимого

вещества, которое на самой далёкой периферии всё равно создаёт силу притяжения, и поэтому звёзды движутся с большой орбитальной скоростью.

Эта теория привела к созданию понятия «**тёмная материя**». Это намного более обширная область: если звёздный диск от центра простирается на 15 кпк, гало на 20–25 кпк, «**тёмная корона**» занимает 100–120 кпк, простираясь практически до галактики Андромеда (рис. 10.26б). И что-то наполняет эту разреженную область гравитационного контроля нашей Галактики.

**О структуре** данного вещества ничего **не известно**, оно тёмное во всех смыслах: не светится, не поглощает ни в каком диапазоне, не взаимодействует электромагнитным образом с излучением и с веществом.

Учёные уже убедились, что это не компактные массивные объекты типа тёмных звёзд или чёрных дыр, их бы заметили. Компактный объект работает как гравитационная линза – искривляет движение светового луча, а вид далёких объектов не искажается. Это что-то распределённое в пространстве, типа элементарных частиц, но каких – не понятно.

Совсем недавно пришло сообщение, что это частицы типа **нейтрино**, но необычных. Вроде бы это **четвёртый тип** – «стерильные», невзаимодействующие, то есть не проявляющие себя никакими ядерными силами. Будет трудно сделать установку, чтобы их поймать.

Вернёмся к спиральной структуре Галактики (рис. 10.27а). Мы радиотелескопом куда-то смотрим (луч ОС) и понимаем, что **спиральный рукав** – это область, где уплотнение межзвёздного газа, значит, оттуда должно идти больше всего радиоволн. Видим, что линия с длиной волны 21 см имеет форму, как на правом изображении. Из этого можем сделать вывод, что есть три уплотнения, движущиеся относительно нас с разной скоростью, и эффект Доплера помогает их разделить. Понимаем, что наш луч зрения протыкает три уплотнения, скорее всего, три спиральных рукава, и по доплеровскому смещению можем сказать, с какой относительной скоростью мы перемещаемся.

На рис. 10.27б представлен **набор линий в 21 см**, полученный в разных галактических долготах. Например, если смотреть в направлении центра Галактики, видна одна простая, немного расширенная, но никуда не смещённая линия в 21 см, потому что в этом направлении при вращении всё движется перпендикулярно нашему лучу зрения, здесь доплеровского эффекта нет.

Если смотреть в других направлениях, там более сложна структура линий в 21 см. Значит, мы смотрим уже не в центр Галактики, а туда, где разные рукава с разной скоростью движутся относительно нас.

Заметим, что система галактических координат ориентирована так, что на центр Галактики идёт 0 (360) градусов, а здесь странная долгота 322 градуса, и ещё римская единица. Дело в том, что ещё когда считали, что направление на центр Галактики

располагается в созвездии Лебедь, ввели систему галактических координат, ориентированную нулём именно туда. Поэтому есть **первая галактическая система координат** и **вторая**, более поздняя. Современные астрономы пользуются второй, но в старых учебниках и каталогах используется первая.

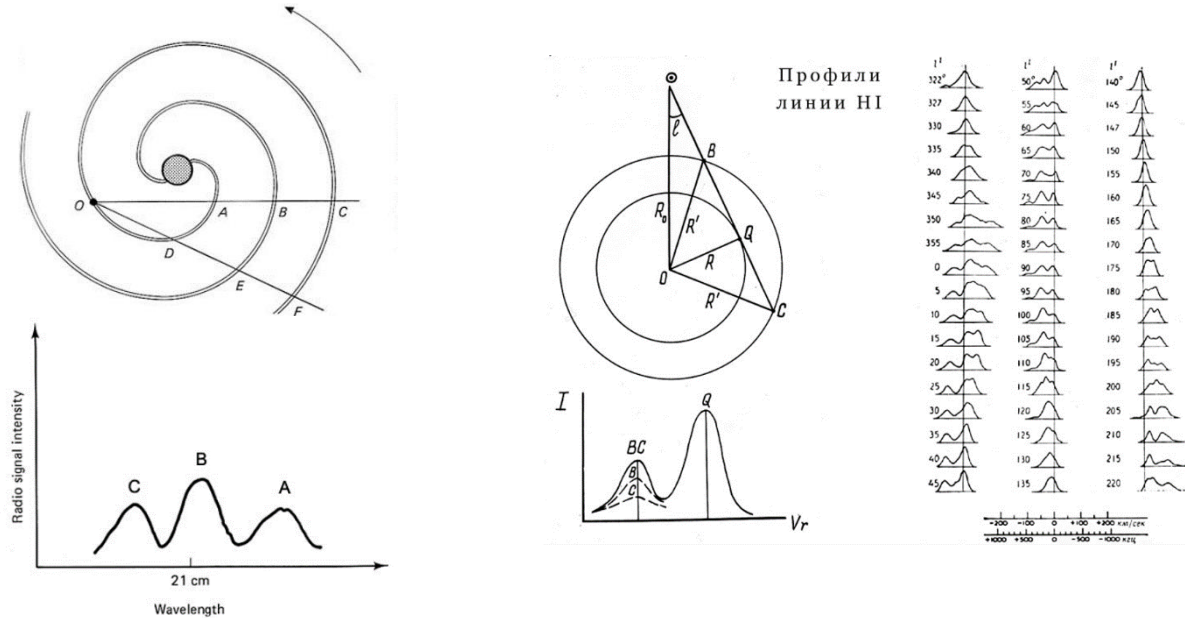


Рис. 10.27. а) исследование распределения нейтрального водорода в диске Галактики по профилю линии 21 см, б) профили линии HI

Первая **карта галактического диска** была создана в 1958 г., когда радиоастрономы уже сделали полный обзор неба (рис. 10.28а). Направления на центр или антицентр Галактики – области, в которых доплеровский эффект не может помочь, но в других направлениях он работает хорошо. Чем чернее участок на карте, тем больше плотность межзвёздного водорода, там должен проявляться спиральный рукав. Но на карте увидеть спиральную картину сложно.

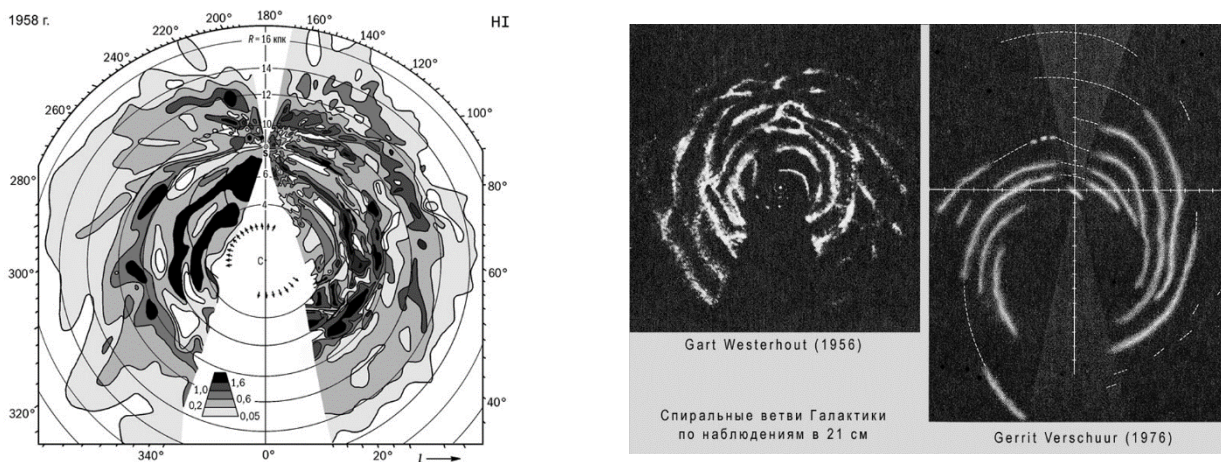


Рис. 10.28. а) первая карта галактического диска, 1958 г., б) Спиральные ветви Галактики по наблюдениям в 21 см, 1956 и 1976 гг.



На рис. 10.28б представлены наблюдения 1956 и 1976 гг. Какие-то **отрезки** видны, но общей картины не возникает.

Пытались использовать другие индикаторы – не холодный межзвёздный газ, а **горячий**, который светит в линии H $\alpha$  (рис. 10.29а). Области горячего газа вроде бы тоже должны концентрироваться в спирали, но картинка всё равно не складывается в общий гранд дизайн.

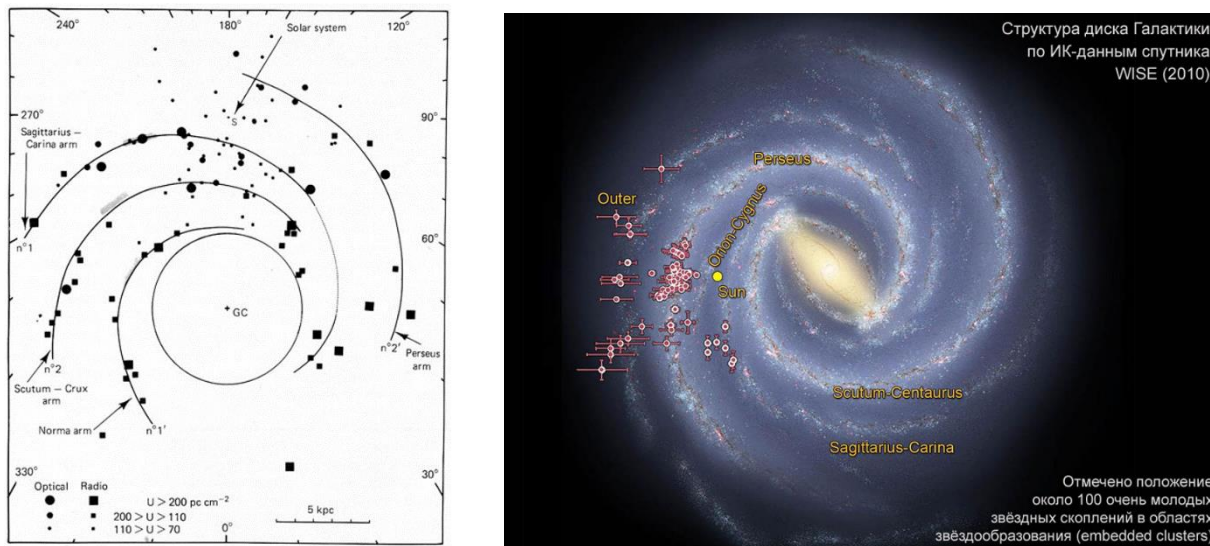


Рис. 10.29. а) спиральная структура Галактики по оптическим и радионаблюдениям зон HII, б) положение некоторых молодых звёздных скоплений на диске Галактики

Недавно была проделана работа, в которой **молодые звёздные скопления** были нанесены на **рисунок спиральной структуры** Галактики (рис. 10.29б). Рукав Персея показывает избыток концентрации, но в соседних всё гораздо хуже.

На рис. 10.30 представлена **математическая модель**. Сначала на модели создали спиральную картину, а потом смоделировали процесс наблюдения. Мы как бы садимся туда, где расположено Солнце, и начинаем немного двигать объекты, расположенные на круге данного радиуса, по отношению к Солнцу. Когда вводятся **ошибки измерения расстояний**, картина становится нечёткой, и там можно с натяжкой увидеть спирали. Для каких-то окончательных выводов надо научиться точно измерять расстояния до объектов.

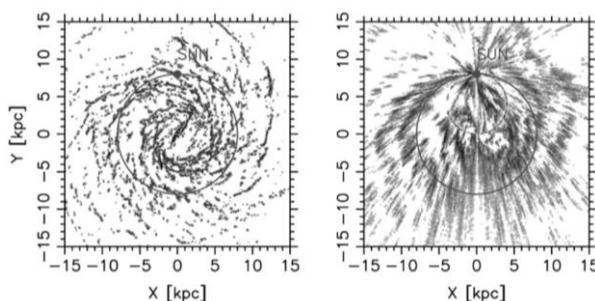


Рис. 10.30. Модель спирали без ошибок наблюдения и с их учётом

Если взять работы последних 10 лет по определению внешнего вида нашей Галактики, среди них будут те, где утверждается, что у неё два спиральных рукава, четыре и даже двенадцать. Это значит, что пока мы не представляем её как целое.

**Флуккулентные спирали** находят **объяснение**. Представим, что вращается звёздная система, и в ней какая-то область звездообразования (рис. 10.31). Даже если линейные скорости вращения одинаковы (а мы видели, что они с расстоянием почти не меняются), угловые скорости при этом будут разные. Значит, данная область будет постепенно вытягиваться, и пока мы в ней видим молодые горячие звёзды, она уже может приобрести форму кусочка спиральной структуры. Возможно, именно из таких кусочков состоят спиральные галактики с флуккулентной (хаотической) структурой.

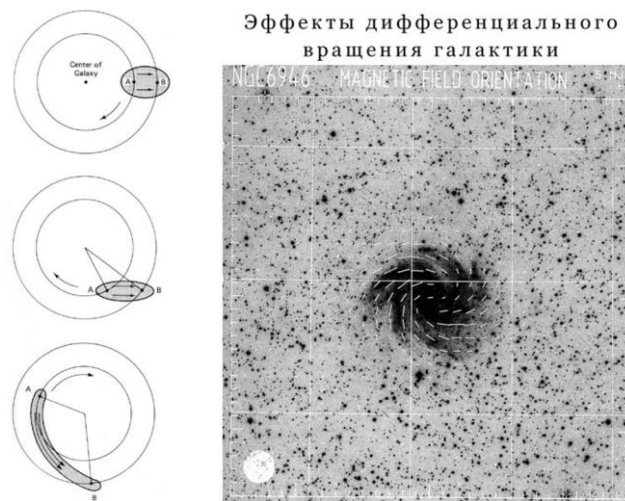


Рис. 10.31. Вытягивание области звездообразования при вращении

Однако у длинных спиральных рукавов в **гранд дизайн** должна быть другая физика. Ещё в середине 60-х годов стали разрабатывать **теорию спиральной волны плотности**. Потом её уточняли и меняли, но сама идея в том, что это самоорганизующаяся гравитационная волна плотности. Звёзды летают в диске по своим орбитам, но их пути концентрируются в спиральнообразных рукавах.

Вспомним простой кеплеровский закон: вся масса в центре, а лёгкие звёзды летают вокруг, тогда все их траектории – замкнутые эллипсы с постоянной ориентацией (рис. 10.32а). Теперь поменяем **закон гравитации**, потому что галактика – это распределённая масса. Надо выбирать более мягкий показатель для силы, чем  $\frac{1}{R^2}$ : гравитация падает с удалением от центра не так быстро, потому что объект притягивает всё более массивная центральная часть. Тогда движение звёзд происходит по эллипсам, но их большая ось и ориентация всё время поворачиваются.

Рассмотрим, к чему это может привести. В диске все звёзды хаотически движутся по своим эллипсам, никакой структуры при этом не видно. Но может сложиться ситуация, когда эти эллипсы будут согласованно поворачивать свои большие оси (рис. 10.32б). Тогда траектории звёзд в некоторых местах диска будут сближаться, значит, там

плотность звёзд в пространстве будет повышаться, и мы увидим спиральную картину, хотя само вещество не движется по спирали. В этом состоит **идея волны плотности** – звёзды гравитацией синхронизуют движение по орбитам и сближают их в каких-то местах диска.

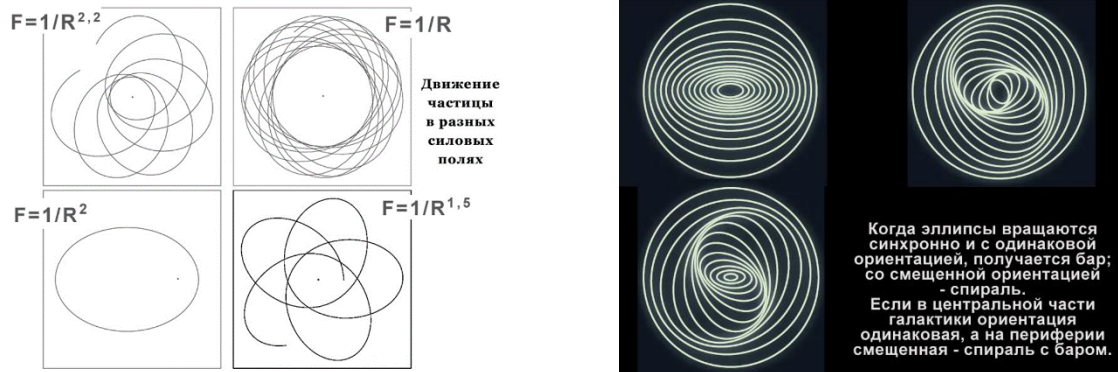


Рис. 10.32. а) движение частицы в полях с разным показателем силы, б) создание спирали в теории волны плотности

Картина спирального узора будет двигаться с постоянной угловой скоростью вокруг центра галактики. Индивидуальные объекты, которые близко к центру, движутся быстрее, а те, которые далеко, медленнее, линейная скорость одна и та же (рис. 10.33а). Значит, одни объекты будут догонять спиральное уплотнение, другие нагонит сама спиральная волна. Но, въехав в спиральный рукав, они будут **уплотняться**.

Если это звёзды, будет кинематический эффект – они не столкнутся, просто пролетят ближе друг к другу. А если это облака межзвёздного газа, они реально могут столкнуться, уплотниться, создать большое облако, и в итоге мы увидим **гигантские молекулярные облака**. Их в Галактике всего несколько тысяч, но они рождаются и концентрируются в спиральном узоре. В них рождаются новые звёзды, которые ярко светятся, ими очерчен спиральный рукав.

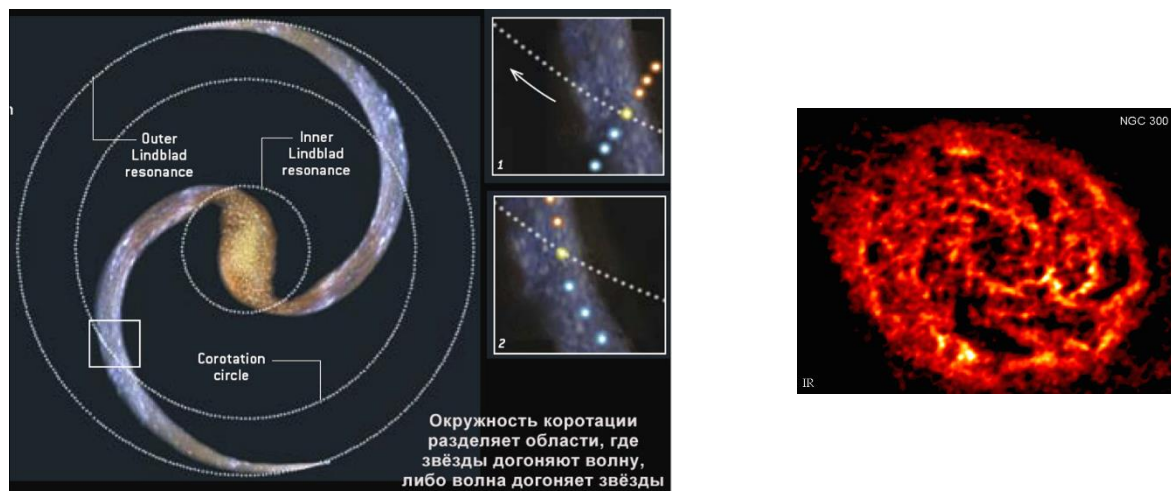


Рис. 10.33. а) попадание объектов в спиральный рукав, б) NGC 300, инфракрасная фотография

На рис. 10.33б показана **инфракрасная фотография** одной из ближайших к нам спиральных галактик NGC 300. Инфракрасный портрет показывает распределение не звёзд, а межзвёздного вещества, тёплой пыли, которая светится в данном диапазоне.

В чёрных участках этой пыли нет, она разрушена, значит, это места, где недавно сформировались звёзды. Молодые звёзды очень сильно нагревают вещество вокруг, как и взрывающиеся сверхновые.

Глядя на спиральные галактики с ребра, мы видим, как в местах, где рождаются звёзды, возникают **потоки вещества от галактического диска** – нагретая среда выбрасывается вдаль. Молодые звёзды разрушают облака, и газу надо куда-то вырваться.

На рис. 10.34а представлена **гидродинамическая модель** S. Silich и J. Franco, построенная в 1999 г. Координата  $z$  – направление от плоскости галактики к северу и к югу. Молодая область звездообразования сначала расширяется симметрично (верхняя картинка в левом столбце), а потом начинает быстрее расширяться туда, где меньше сопротивление (картинки под ней). В горизонтальной плоскости проходит диск, там соседний газ, а наверх и вниз из диска расширяться легче, как и при любом взрыве.

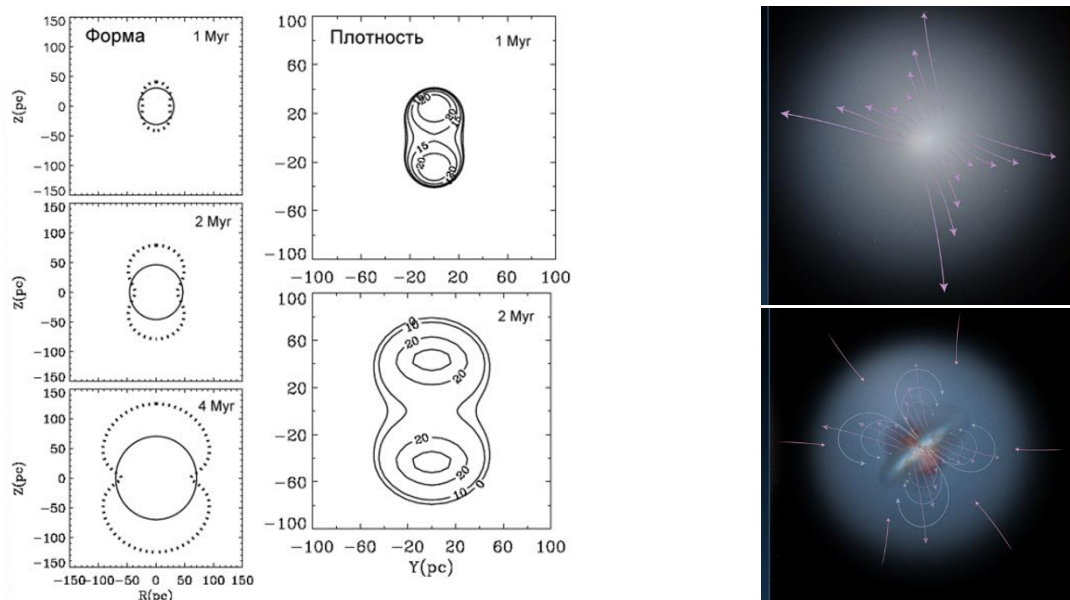


Рис. 10.34. а) эволюция сверхоболочки, раздутой молодым звёздным скоплением из недр ГМ в диске БМО, б) два варианта поведения газа, выброшенного галактическим диском

Дальше могут быть **два варианта**. Если галактика очень активна в смысле звездообразования, выброшенный газ может её покинуть и никогда не вернуться (рис. 10.34б, сверху). Доказательства этого мы видим: в скоплениях галактик межгалактическая среда обогащается тяжёлыми элементами. Значит, это газ, выброшенный из галактик, где он был обогащён взрывами сверхновых.

А если галактика не очень активная, звёзды рождаются редко и не очень сильно нагревают газ, он **взлетит, охладится и упадёт** (рис. 10.34б, снизу).

**Наша Галактика не особенно активная:** в год рождается 5–10 новых звёзд. Они так распределены, что нигде сильного нагрева не обеспечивают. Отток газа из диска нашей Галактики не очень активный, он быстро охлаждается и снова падает на плоскость (рис. 10.35а).

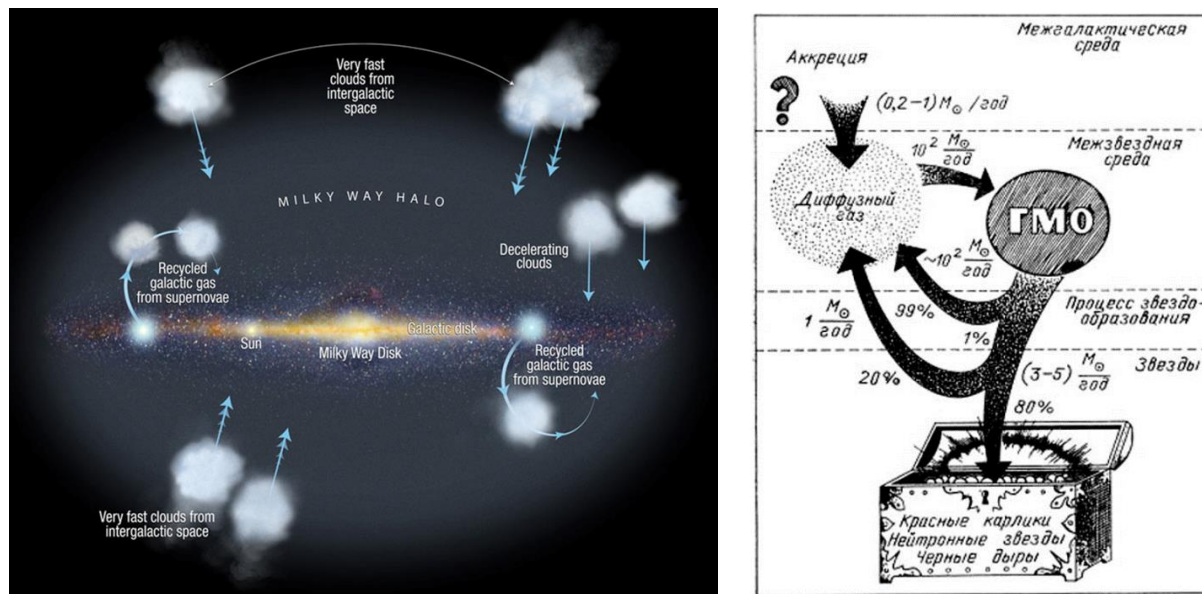


Рис. 10.35. а) потоки газа в Галактике, б) круговорот вещества в Галактике

Но ещё видно, что издалека в Галактику прибывает **дополнительный газ**, который содержит меньше тяжёлых элементов. Он приходит из соседних галактик или из спутников вроде Магеллановых облаков. Большое Магелланово облако вообще скоро упадёт на нашу Галактику и принесёт очень много межзвёздного газа, бедного тяжёлыми элементами.

На рис. 10.35б показан **круговорот вещества в Галактике**. Диффузный (разреженный) газ галактического диска охлаждается, и из него рождаются гигантские молекулярные облака. В них формируется новое поколение звёзд, которые дальше разрушают это облако. После разрушения облака большая доля этого газа снова переходит в диффузную тёплую форму, но 1% массы облака всё-таки переходит в форму звёзд. Дальше эти звёзды живут, эволюционируют, сбрасывают ветер, планетарные туманности, оболочки сверхновых. Всё это в виде газа возвращается в диффузную форму.

Из этого круговорота постоянно в небольшом количестве выпадают **остатки эволюции звёзд** – белые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры. Они постепенно остывают, но в диффузную форму уже не вернуться.

Возможно, ещё есть **добавка газа** со стороны в размере порядка одной солнечной массы в год, радиоастрономы это наблюдают.

Молодые звёзды в нашей Галактике звёзды рождаются группами, которые мы называем **звёздными скоплениями**. Внутри таких групп звёзды часто пролетают рядом,

меняют взаимным притяжением свои траектории, немного обмениваются кинетической энергией, как любые молекулы в газе (рис. 10.36а). Они должны прийти в равновесное распределение по скоростям. Максвелл доказал, что случайное хаотическое взаимодействие мелких частиц должно привести к **статистическому распределению**, у которого есть средняя скорость, которую имеет большинство объектов, но есть и медленно, и быстро движущиеся.



Рис. 10.36. а) хаотическое взаимодействие одинаковых звёзд, б) распределение молекул по скоростям, испарение молекул со скоростью выше критической

Если молекул много, и объём не закрыт, то молекулы, движущиеся со скоростью больше критической, будут его покидать (Максвелловский «хвост») (рис. 10.36б). Если объём закрыть, **испарения** не будет. Но у звёздных скоплений нет стенок, поэтому звёзды тоже будут из них улетать, если наберут скорость больше критической, то есть второй космической для данного скопления. Так происходит диссипация («испарение») звёзд из скоплений.

Ещё один эффект, губящий звёздные скопления, это **динамическое трение**. Теоретически его описал в 1943 г. С. Чандрасекар, а впервые отметил на практике в 1976 г. В. Г. Сурдин.

$$\frac{1}{M} \frac{dE}{dt} = - \frac{4\pi G^2 M \rho}{v} \ln \Lambda F \left( \frac{v}{\langle v \rangle} \right)$$

Массивное тело, например, звёздное скопление, летит в галактике, а навстречу ему летят одиночные звёзды поля (рис. 10.37а). Они притягиваются к скоплению, значит, их траектории загибаются, и они по гиперболическим орбитам пролетают позади этой массы. То есть за звёздным скоплением область повышенной концентрации звёзд. Значит, возникает избыточная сила, которая тянет звёздное скопление назад, то есть тормозит. Прямого взаимодействия нет, но чисто **гравитационное** есть.

Шаровое скопление, двигаясь через поле галактики, таким образом тормозится, значит, его траектория постепенно приближается к центру галактического гравитационного потенциала, и **скопление падает на центр** (рис. 10.37б).



Рис. 10.37. а) динамическое трение, б) падение шарового скопления на центр Галактики, в) параметры выживших шаровых скоплений

Расчёты показали, что те шаровые скопления, которые **выжили** в нашей Галактике, за несколько миллиардов лет на центр не упали. Скопления ниже ветви b на рис. 10.37в распались из-за испарения звёзд, а скопления выше ветви a упали на центр галактики. Любая популяция объектов во Вселенной, которую мы наблюдаем, - результат естественного отбора, их не затронул ни один механизм разрушения.

Мы даже видим, как галактика-спутник спиральной галактики, разрушаясь, оставляла за собой **поток одиночных звёзд** (рис. 10.37а)

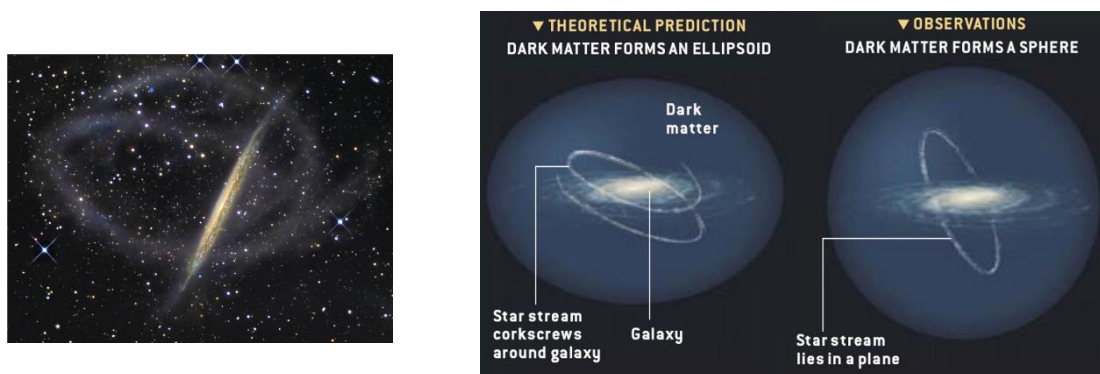


Рис. 10.38. а) поток одиночных звёзд при разрушении галактики, б) оценка формы тёмного гало Галактики по орбите потока

Наблюдать за этими потоками важно, потому что они являются косвенным **способом определения распределения тёмной массы в галактиках**. Если тёмная корона (тёмное гало) нашей Галактики сферически симметрично, данные потоки будут двигаться по простым эллиптическим орбитам, пока не рассеются (рис. 10.38а, слева). А если распределение тёмного вещества, например, эллипсоидальное, гравитационный потенциал тоже будет не центрально-симметричным, и движение звёзд будет происходить не по эллиптическим траекториям (рис. 10.38б, справа).

## Лекция 11. Морфология галактик

### Наблюдения галактик

Термин «внегалактический» сегодня относится к тому, что находится за пределами нашей Галактики. Но **изначально**, когда ещё не было представления о том, что мы живём в отдельной звёздной системе, и что рядом есть подобные, это слово обозначало другое. В Млечном Пути видели много эмиссионных горячих газовых **туманностей**, и за его пределами тоже были видны размытые туманные объекты (рис. 11.1). Они явно отличались от звёзд, и в 19 веке для них создали каталог NGC.

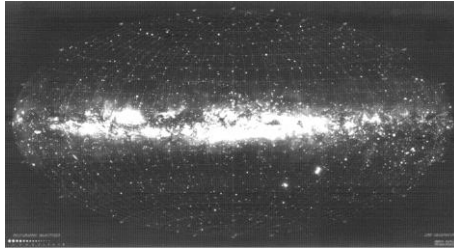


Рис. 11.1. Туманности на Млечном Пути и вне его

Когда в нём собрали всю совокупность туманных пятен, разделили их на две группы: **галактические** – расположенные на фоне Млечного Пути, и **внегалактические** – те, что за пределами его полосы. Тогда считали, что и то, и другое принадлежит нашей звёздной системе, и слово «внегалактический» обозначало то, что находится за пределами Млечного Пути, но недалеко и разбросано по всему небу.

В начале 19 в. Смит, глядя на **M51**, зарисовал её (рис. 11.2а). Тогда он не знал, что это такое. Дальше, ближе к середине 19 в., Гершель в более светосильный телескоп увидел в M51 какую-то структуру (рис. 11.2б). Наконец, лорд Росс сделал телескоп почти двухметрового диаметра, и тогда стало понятно, что у этих пятен **симметричная спиральная структура** (рис. 11.2в).

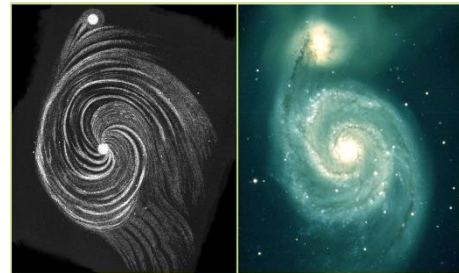
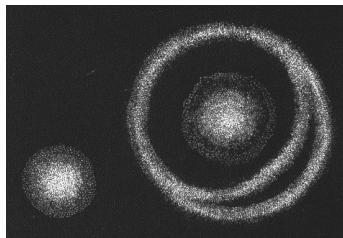
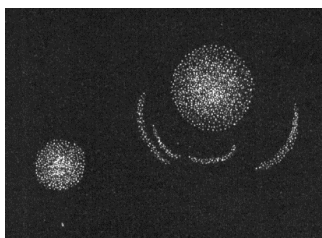


Рис. 11.2. а) рисунок галактики M51 после наблюдений Смита, б) после наблюдений Гершеля, в) по наблюдениям лорда Росса и фотографии с Земли 21 в.

Но тогда считали, что это рождается звезда, а вокруг неё протопланетный диск. Все более-менее округлые туманности, имеющие геометрическую форму – планетарные или такие спиралеобразные – интерпретировали таким образом.



На рис. 11.2в представлены **рисунок** лорда Росса, наблюдавшего галактику M51 глазом, и **современную фотографию** её с Земли. ПЗС-матрица видит более слабо светящиеся детали, но геометрическая структура и там, и там передана достаточно точно.

Если смотреть на ближайшую к нам галактику Андромеда невооружённым глазом, можно увидеть только самую **плотную центральную конденсацию**, у периферийных частей очень маленькая поверхностная яркость.

На рис. 11.3а показаны для примера галактика **Андромеда и Луна**, угловой масштаб выдержан. Протяжённость звёздного диска Андромеды в 6 раз больше лунного диска, это 3 градуса.



Рис. 11.3. Звёздный диск Андромеды и диск Луны в одном масштабе, б) Галактика M94, в) Галактика NGC 1309

**Морфология галактик** – это их внешний вид. Любое изучение новых объектов начинается с их внешности. Мы их рассматриваем, коллекционируем и пытаемся разложить их по каким-то группам (типам), то есть начинаем делать **морфологическую классификацию**. Иногда она приводит к заблуждению, если внешнее сходство наблюдается у совершенно разных объектов. Но чаще всё-таки приносит понимание, как эти объекты выстроены по параметрам – размерам, массам, эволюционным фазам. Для этого надо привлекать ещё и теоретические соображения.

Обычно в книгах демонстрируют спиральные галактики. Их не так уж много: процентов 25% от всех галактик.

Но и **спиральные галактики** бывают разные. У некоторых прямо из центра начинают раскручиваться спиральные рукава, их можно проследить на несколько оборотов вокруг центра (рис. 11.3б). Такие галактики мы называем **нормальными спиралями**, или просто спиральными галактиками.

Бывают **пересечённые спирали**, когда в центре видна некая эллипсоидальная концентрация звёзд, а от её концов начинают отходить спиральные рукава (рис. 11.3в). Эти галактики называются галактиками с центральной перемычкой, или с баром.

В простых книгах обычно написано, что дисковые спиральные галактики – это идеальная плоскость симметрии, относительно которых наблюдается зеркальная симметрия тела галактики. Однако на самом деле плоскость наблюдается редко. Если на рис. 11.4а проследить, в какой плоскости лежит центральная часть, и в какой периферия,

оказывается, что **плоскости** по мере удаления от центра немного **наклоняются** по отношению друг к другу.



Рис. 11.4. а) диск галактики NGC 1055, б) наклон плоскостей диска в ESO 510

Такое происходит и в нашей Галактике. То, что мы находимся в диске, помогает нам понять, плоский он или нет. В направлении центра Галактики плоскость за центром уходит вниз, а в направлении антицентра загибается вверх (аналогия в другой галактике представлена на рис. 11.4б). Прецессия это в физическом смысле или нет, ещё предстоит понять.

Как правило, считается, что у этого внешняя причина, то есть некое **внешнее массивное тело** вызывает изгиб галактической плоскости. Для нашей Галактики это можно списать на Магеллановы облака, к ним как раз наклонён диск Галактики. Но очень часто бывает, что у галактики нет массивного спутника, а данный эффект всё равно чётко виден.

Это может быть интересным указанием на то, что находится вокруг светлого тела. Мы уже знаем, что у галактик есть **тёмное гало (тёмная корона)**, и чем оно массивнее, тем более динамически строгим является движение звёзд и газа в плоскости: гравитационное поле большой симметричной массы стабилизирует вращение объектов в плоскости. Ещё в начале 70-х годов работы, подтвердившие, что без неё диск галактик был бы намного менее стабильным. Возможно, в изогнутых галактиках масса тёмного вещества как раз недостаточна.

Вторая популяция галактик, не похожих на спиральные, – **эллиптические** (рис. 11.5). У них есть тело, и все их свойства – эллипсоидальность и концентрация яркости к центру.



Рис. 11.5. а) эллиптические галактики со звездообразным ядром и б) без него – M110, в) гигантская эллиптическая галактика M86

У некоторых эллиптических галактик есть **звёздообразное ядро**, то есть оно не разрешается по своему угловому размеру, но присутствует там и показывает очень большую плотность (рис. 11.5а). А есть галактики, у которых ядро (кern) отсутствует. Таковой является галактика М 110, крупнейший спутник Андромеды (рис. 11.5б). У неё есть только довольно слабый градиент яркости. Такие галактики принято называть **сфероидальными**.

Есть **гигантские эллиптические галактики**. На рис. 11.5в такая большая передержка, что внутри тела не видно вообще никакой структуры. Обратим внимание, что на переднем фоне видны яркие звёзды нашей галактики, а рядом с галактикой **М86** ещё одна далёкая галактика. Но ещё явно видна концентрация небольших звёздообразных изображений к данной галактике. Чем ближе к ней, тем их всё больше.

Это **шаровые звёздные скопления**. Если в нашей Галактике их 150–170, то в М 86 их больше 12 тыс. Эта галактика является гигантом, потому что обычно число шаровых скоплений пропорционально массе родительской галактики. Это когда-то наводило астрономов на мысль, что шаровые скопления родились раньше самих галактик, а потом пропорционально вошли в состав формирующихся галактик.

Надо как-то посмотреть, какая **структура внутри галактики**. Обычно делают несколько фотографий с разными экспозициями – маленькой, средней, большой, – и на них получают всё более яркие центральные части. А потом пытаются это аппроксимировать какой-то геометрической фигурой. Обычно это делают самой простой формой – эллипсом (рис. 11.6).

Получается набор **эквиденсит** – реально измеренных линий постоянной поверхностной яркости (на рис. 11.6 они изогнутые). Чем ближе к ядру, тем больше поверхностная яркость. В них довольно хорошо вписываются **эллипсы**, правда, какие-то части не укладываются (выделены красным). Создаётся впечатление, что есть ещё какое-то дисковое население, которое внедрено в эту эллипсоидальную фигуру. Возможно, у некоторых эллипсоидальных галактик есть что-то, подобное слабому диску, происхождение которого может быть разным.

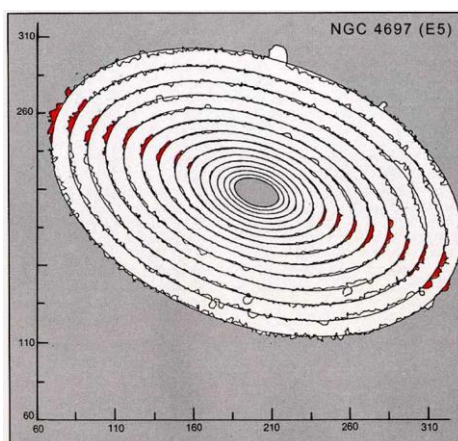


Рис. 11.6. Эквиденситы и эллипсы в галактике NGC 4697

Для жидких эллиптических тел верно, что чем быстрее оно вращается, тем более сжато в экваториальной области. Но в середине 70-х уже начали измерять скорости вращения эллиптических галактик. И оказалось, что есть весьма вытянутые (сжатые) галактики, которые не вращаются. Выяснилось, что **сжатие у звёздных систем может быть совсем по иной причине**, чем у жидких однородных систем.

Если провести большие оси эллипса через внешние эквиденситы и через внутренние, они будут немного не совпадать, между ними образуется определённый угол. То есть с переходом от центра к периферии сам эллипс, аппроксимирующий форму галактики, может немного поворачиваться, и это тоже требует динамического объяснения.

Поначалу астрономы подходили к галактикам и их формам, основываясь на точной математической **теории равновесия вращающихся жидких тел** (рис. 11.7а). Сжатые и иногда вытянутые сфероиды Якоби казались теми объектами, которые можно сопоставить реальным галактикам. Но надо помнить, что это математическая форма фигуры постоянной плотности.

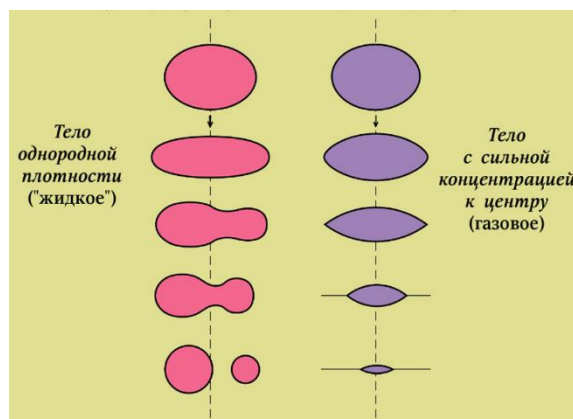
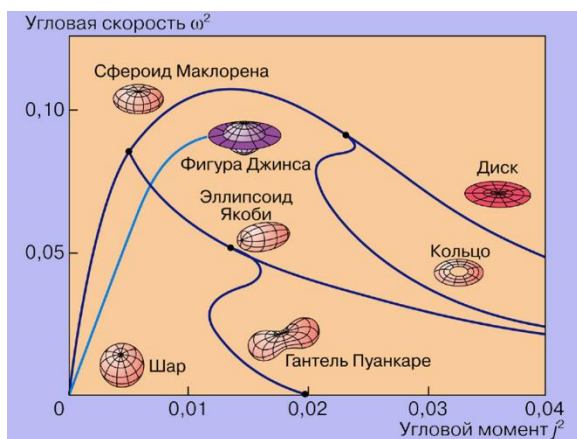


Рис. 11.7. а) теория равновесия вращающихся жидких тел, б) эволюция вращающихся самогравитирующих тел – жидких и газовых

Вытянутую фигуру могут создать **отдельные направления движения звёзд**. Представим, что часть звёзд летает по орбитам в одну сторону, и такое же количество в другом направлении. Такие звёзды могут создать диск (идеально сжатый эллипсоид), оптическое сжатие такой системы способно быть очень сильным, почти до плоскости, но система в целом вращаться не будет (рис. 11.7б). Таким образом, может быть эллиптическая галактика любой формы, при этом **не вращающаяся**.

Точные фотометрические измерения, то есть измерения яркости на теле галактики показали, что бывает две группы эллиптических галактик – «**Disky**» и «**Boxy**» (рис. 11.8). Первая группа – когда на фоне идеального синего эллипсоида реальная галактика на экваторе немного шире, чем должна быть (верхняя картинка). А во второй группе части галактики выпирают под углами 45 градусов (нижняя картинка). Такое различие тоже должна объяснять какая-то динамика.

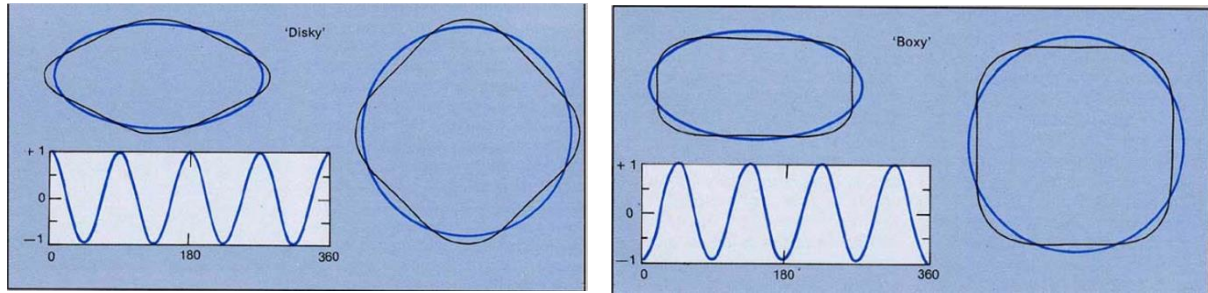


Рис. 11.8. Две группы эллиптических галактик – «Disky» и «Boxy»

Галактику надо объяснять как совокупность звёздных орбит. На рис. 11.9 показана принятая в звёздной динамике **технология изображения орбит звёзд**. На верхнем левом рисунке горизонтально идёт экваториальная плоскость,  $z$  – это направление оси вращения галактики. Сама плоскость – меридианальная, которая сопутствует движению звезды.

Сначала рассмотрим **меридианальную плоскость** в Солнечной системе (нижний рисунок). Если планета движется вокруг Солнца по круговой орбите, на меридианальной плоскости мы её обозначим просто точкой, планета будет всегда находиться в сопутствующей плоскости на радиусе орбиты.

А если орбита эллиптическая, планета будет то ближе, то дальше от Солнца, и на этой плоскости её траектория будет занимать всю чёрную линию, но планета тоже всегда будет находиться в плоскости своей орбиты.

Теперь вернёмся к звёздам и посмотрим, насколько по-разному движутся **звёзды относительно плоскости галактики** (верхние рисунки). Звёзды перемещаются и по координате  $z$ , и по координате  $R$ . В зависимости от того, из каких орбит конструируем галактику, можно придать ей любую форму.



Пример движения в центральносимметричном поле: комета в Солнечной системе



Рис. 11.9. Движение звёзд относительно плоскости Галактики

### Классификации галактик

Первым создал **классификацию наблюдаемых форм галактик Э. Хаббл** в 1925 г. Он представил её в виде простой **двумерной схемы** (рис. 11.10). E – эллиптические галактики, S – спиральные. В горизонтальной ветви располагаются **эллиптические галактики**, цифра обозначает степень сжатия. Степень сжатия определяется по формуле

$10 \frac{a-b}{a}$ , где  $a$  и  $b$  – большая и малая полуоси эллипса соответственно. Она может быть от 0 (круглая галактика) до некоего максимального значения, у Хаббла это E7. Сегодня мы такие галактики не находим, но E6 точно есть.

В нижней ветви идут **простые спирали с баром**, а в верхней – **нормальные спирали**. Буквы a, b, c обозначают раскрученность спиральных рукавов. Медленно уходящие от центра, если идти по азимуту, обозначаются буквой a, а быстро уходящие – c. Аналогичные обозначения.

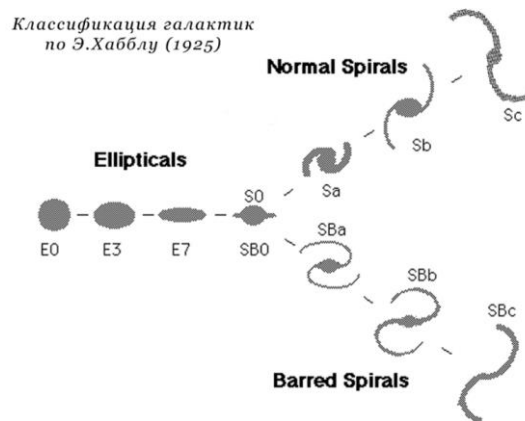


Рис. 11.10. Классификация галактик по Э. Хабблу, 1925 г.

Хаббл ввёл **класс S0**, к которому относятся галактики, у которых явно есть диск, но на нём нет спирального узора. Таких галактик довольно много.

Хаббл думал, что эта последовательность эволюционная, то есть галактики рождаются круглыми, по мере сжатия нарастает скорость вращения, галактика становится всё более сжатой, и в конце концов на диске рождается спиральный узор. Сейчас астрономы понимают, что **такой эволюционной последовательности не может быть**, многие свойства галактик разных типов принципиально различаются. Спиральные галактики вращаются всегда, эллиптические часто вообще не вращаются.

На рис. 11.11а представлена галактика **M104**. Яркая сферическая компонента убирается техническими приёмами – цветом, снятием радиального градиента яркости и т. д. На рис. 11.11б диск уже просматривается, в нём видны спиральные рукава, туго закрученные вокруг ядра. Поэтому по Хабблу это спираль **Sa**. В современной классификации у неё более сложный тип SA(s)a.



Рис. 11.1б. Галактика M 104: а) обычная фотография, б) после обработки

На рис. 11.12а галактика **M81** переходной тип от а к b (**Sab**). Рукава уже явно отделились друг от друга и начинают по радиусу удаляться от ядра.



Рис. 11.12. а) галактика M 81, б) галактика M 33

На рис. 11.12б представлена галактика **M33** – спираль **Sc**, крайний тип по Хаббл. Она расположена недалеко от нас в созвездии Треугольник. В ней почти нет центрального сгущения, есть маленькое ядро. Она представляет собой, наверно, крайний случай маленькой спиральной галактики, её масса на порядок меньше массы нашей Галактики. Очень маленькими спирали не бывают.

Удобнее сопровождать такие схемы **фотографиями реальных прототипов** (рис. 11.13а).

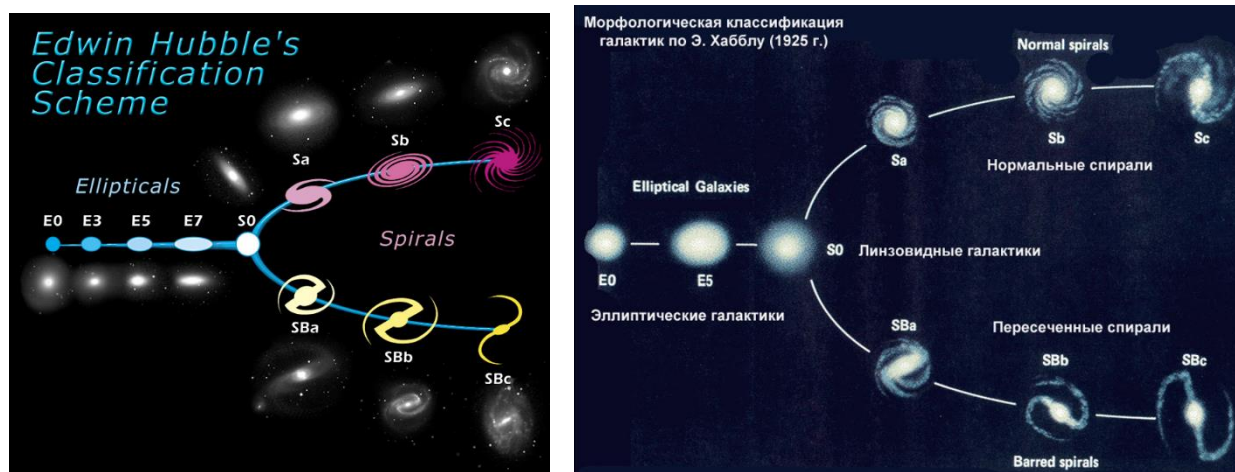


Рис. 11.13. а) типы галактик с реальными прототипами, б) морфологическая классификация галактик по Э. Хаббл с современными поправками

**Современные каталоги галактик** уже не содержат тип **E7**, потому что, если мы находим такие галактики, как правило, они оказываются просто дисковыми галактиками, развёрнутыми под некоторым углом к нам, и точные наблюдения показывают, что они не эллиптические. Современная последовательность эллиптических галактик **заканчивается на E5 (иногда на E6)**, дальше идут дисковые.

**S0** сегодня принято называть **линзовидными галактиками**.

На рис. 11.13б представлена чуть более поздняя работа Хаббла, в которой представлено нечто среднее между фотографиями и рисунками галактик, и передана их реальная наблюдаемая форма.

Иногда не рисуют схемы, просто показывают прототипы (рис. 11.14).

Рассмотрим ещё одну общую тенденцию вилки Хаббла. Между спиральными галактиками нарисована стрелка. От самых «растрёпанных» спиралей к самым плотным эллиптическим галактикам **меняется соотношение компонентов**. Любую галактику можно разделить на **диск и гало**, и их относительная яркость, а значит, и относительная масса меняется. У Sc только диск, гало мы не видим, дальше при движении влево оно всё в большей степени начинает присутствовать, а у эллиптических остаётся только оно и изредка намёки на диск. Скорее всего, эта тенденция имеет эволюционный смысл.

**S0** в последних модификациях вилки Хаббла разделили на два подтипа – **обычную и с баром**, в которой уже чувствуется наличие центральной эллипсоидальной конденсации.

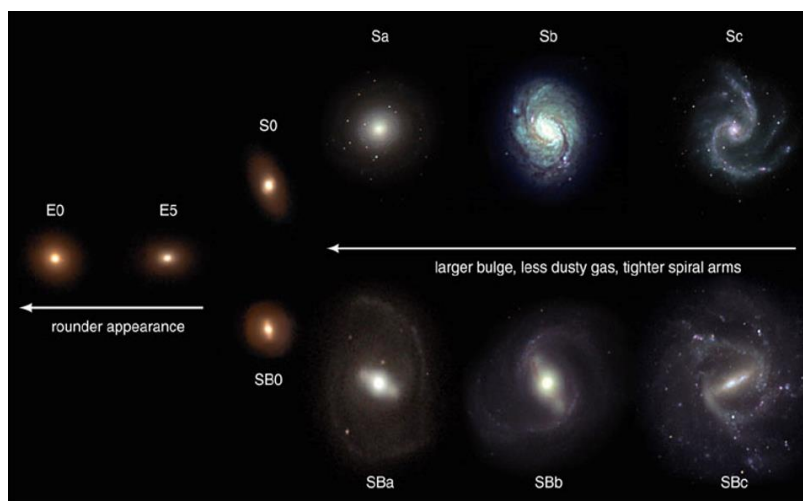


Рис. 11.14. Изменение соотношения диска и гало, а также цвета галактик

Динамические модели жизни большой звёздной системы показывают, что у неё сфероидальное ядро может превращаться в вытянутое, а потом через несколько оборотов сжаться в сферически симметричное вновь. То есть возможны **перескоки по мере эволюции спиральной галактики из одного типа в другой**.

Если сольются две спиральные галактики, то, что получится, будет сложно отличить от эллиптической галактики.

Также заметим, что **цвет галактик** тоже **меняется от голубого к красному**. Так происходит, потому что в дисковых галактиках до сих пор ещё много межзвёздного вещества и рождаются новые звёзды, в том числе и массивные, которые ярко светятся и имеют высокую температуру. А у эллиптических галактик почти нет межзвёздного вещества, там уже давно не рождаются звёзды, а сохранившиеся до наших дней маломассивные красные.

На рис. 11.15а тоже галактики, но непонятно, к какому типу их отнести. На верхнем левом изображении одни звёзды, на остальных очень много газа, но форма у всех неправильная.



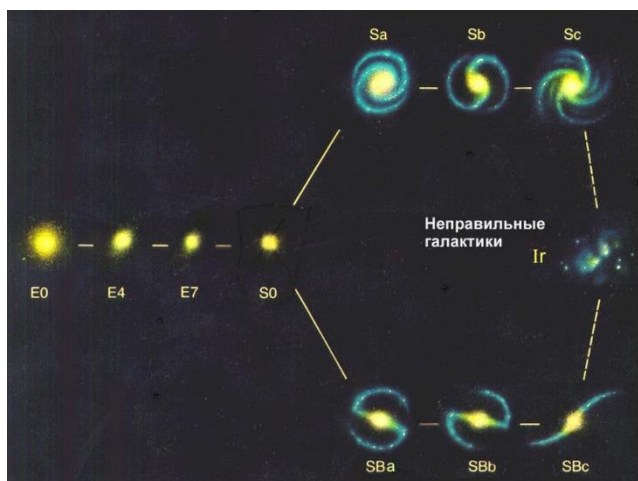


Рис. 11.15. а) фотографии галактик неправильной формы, б) классификация галактик по Э. Хабблу, в которую добавили неправильные галактики

Хаббл придумал место в последовательности, куда относил все галактики непонятной формы (рис. 11.15б). Он назвал их **неправильными (иррегулярными)** и обозначил Ir. Галактики типов Sc и SBc самые «растрёпанные», поэтому Хаббл поместил неправильные галактики между ними.

Если смотреть по массе, то спирали слева направо становятся **всё менее массивными**, а неправильные галактики, как правило, ещё менее массивные, так что, возможно, это действительно некая последовательность.

**Свою Галактику** мы со стороны не видели, но мы знаем, что она плоская и, скорее всего, спиральная, по крайней мере в области Солнца такой узор намечается чётко (рис. 11.16а). Долгое время считалось, что она без бара, но инфракрасные наблюдения со спутников показали, что небольшой бар (3 кпк в длину) есть. Теперь её морфологический тип **S(B)b** – спираль, возможно с баром, переходный тип между b и c.

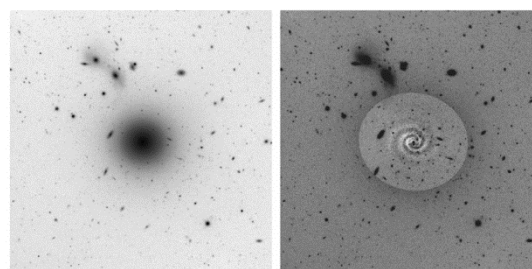
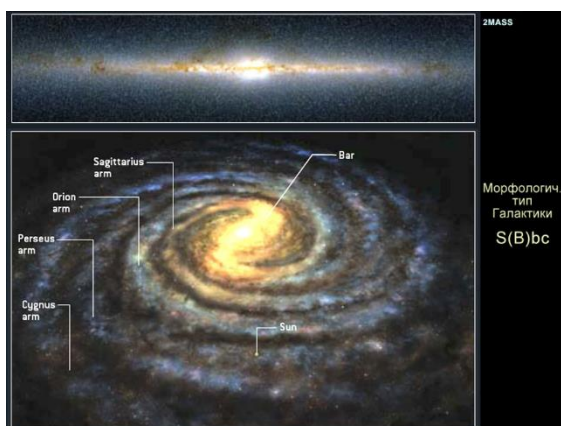


Рис. 11.16. а) морфологический тип Галактики, б) галактика IC 3328, старая и современная фотографии

В **существовании спирали** у некоторых галактик до сих пор бывают заблуждения. Слева на рис. 11.16б фотография, полученная на фотопластинке (негатив),

где галактика IC 3328 кажется эллиптической. Справа представлена современная электронная фотография, когда можно менять градиент, обрабатывать, снимать перепад яркости, и теперь на ней проявились спирали. Поэтому с полученными изображениями ещё надо работать. Иногда были открытия, что одна система спиральных рукавов закручивается в одном направлении, а другая внутри неё в другом.

Есть галактики, морфологию которых невозможно определить, потому что у них яркое ядро (рис. 11.17а). Такие галактики мы обычно называем **активными** или **квазарами**. В ядре обычно что-то происходит – либо вспышка звездообразования, когда массово рождаются звёзды, либо сверхмассивная чёрная дыра, на которую происходит аккреция.

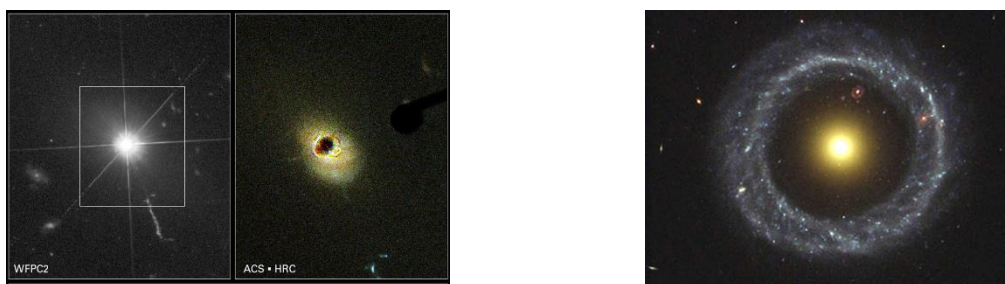


Рис. 11.17. а) квазар 3C 273, б) кольцеобразная галактика

На рис. 11.17б представлена галактика правильной формы, значит, она не иррегулярная. У неё есть кольцо и ядро. Интересно, что через эту галактику видна ещё одна такая же, но находящаяся гораздо дальше. Значит, надо придумывать дополнительное направление классификации, которое учло бы такие **кольцеобразные галактики**.

В итоге **П. Ходж** в 1966 г. сделал **классификацию Хаббла многослойной** (рис. 11.18). В ней вилка Хаббла сохраняется. Слева эллиптические галактики, потом линзообразные, дальше идут галактики с рингом и без ринга, с баром и без бара.

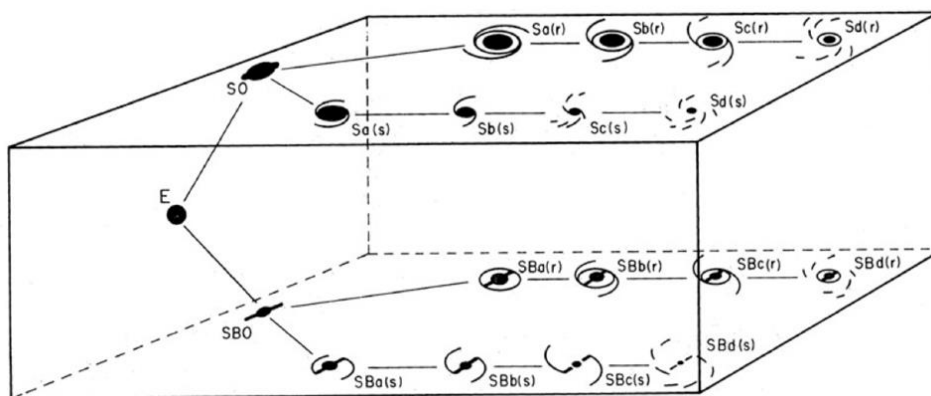


Рис. 11.18. Объёмная версия диаграммы Хаббла, предложенная П. Ходжем, 1966

Однако данная идея тоже оказалась промежуточной. **Ж. де Вокулера** в 1956 г. предложил **трёхмерную классификацию галактик**. На рис. 11.19а представлен один из

её срезом, из которых набирается трёхмерная веретенообразная фигура. Полную фигуру как бы нарезают на слои, и каждый слой ещё имеет ход по азимуту.

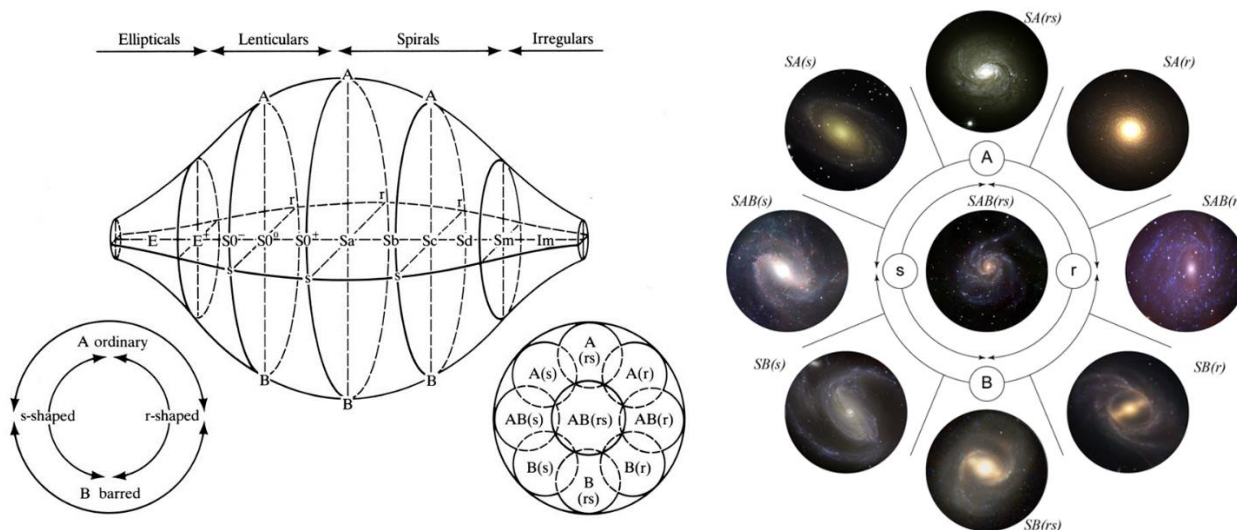


Рис. 11.19. а) трёхмерная классификация галактик, Ж. де Вокулера, б) фотографии галактик разного типа по данной классификации

Вокулера предложил для симметрии обозначить галактики без бара **SA**, а с баром **SB**. При наличии кольца (ринга) добавляется буква **r**, а при отсутствии **s**. Так можно классифицировать галактики одного морфологического типа.

На рис. 11.19б представлены **реальные изображения галактик разных типов** по данной классификации.

В трёхмерной классификации (рис. 11.19а) сначала идут **эллиптические галактики**, потом **линзообразные**, дальше **спирали**, в том числе типов **Sd** и **Sm** (*m* – магелланового типа), и в конце **иррегулярные**. Такая классификация охватывает все более-менее правильные формы галактик, а в иррегулярные попадают те, которые классификации не поддаются. Но с трёхмерной классификацией работать сложно, поэтому её нарезают на **слои**.

Геометризация Хаббла и Вокулера **скрывает личные особенности** каждой галактики. Интересные формы галактик не укладываются в простую схему.

Тогда Б. А. Воронцов-Вельяминов решил вообще уйти от классификации галактик, а вместо этого каждую **описывать набором** каких-то **признаков**.

Был создан **морфологический каталог галактик Б. А. Воронцова-Вельяминова** – многотомное издание, где для каждой обнаруженной на паломарских атласах галактики описано буквенно-числовой формулой, что там видно (рис. 11.20). Было непонятно, как это можно применять, но, когда появились компьютеры, всё это перевели в числовую форму. Теперь легко делать статистику, например, галактики какого типа чаще находятся в скоплениях или между ними, какие соседствуют друг с другом и согласуются ли при этом их формы.

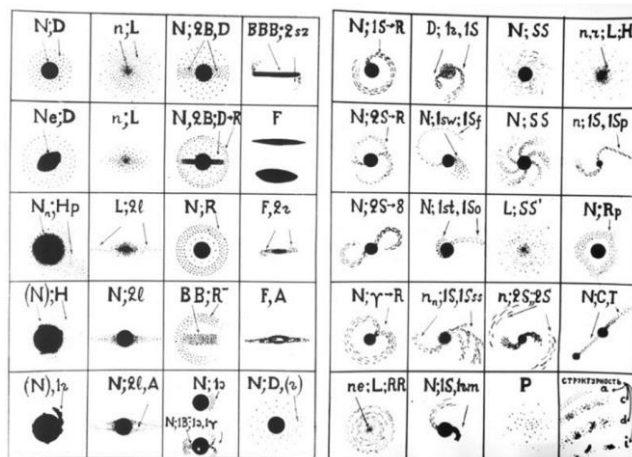


Рис. 11.20. Морфологическая классификация галактик Б. А. Воронцова-Вельяминова

Астрономия последних лет стала всеволновой. На одни и те же объекты смотрят и в оптическом, и в рентгеновском, и в ультрафиолетовом, и в инфракрасном, и в гамма-диапазоне, и их **морфология может зависеть от диапазона**.

На рис. 11.21а представлена **галактика Андромеды (M31) в оптическом диапазоне**, на рис. 11.21б она же в **ультрафиолетовом**. Что-то общее есть, но на первом изображении превалирует сфероидальная компонента, которая забивает центральную часть диска, на втором она исчезает, и на первый план выходят спиральные ветви.



Рис. 11.21. Галактика Андромеды (M 31) в оптическом (а) и в ультрафиолетовом (б) диапазонах

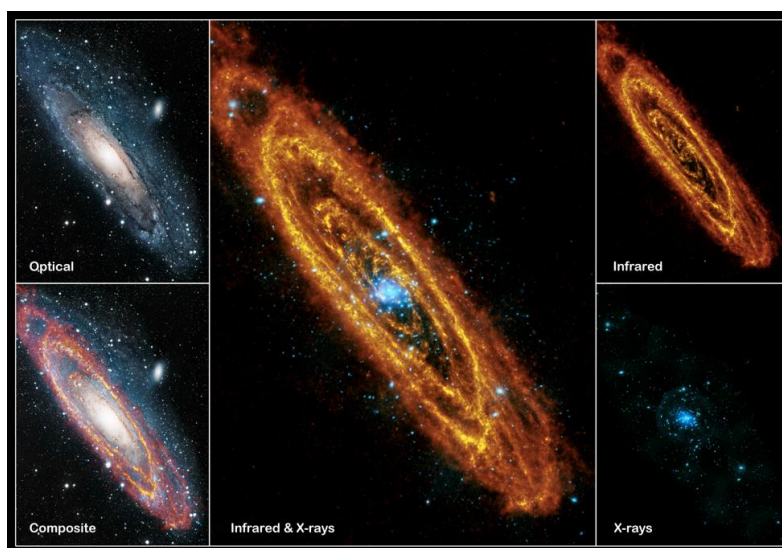


Рис. 11.22. Галактика Андромеды в разных диапазонах, комPOSITE портреты

На рис. 11.22 Андромеда представлена в **оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазонах** излучения, а также приведён её **композитный портрет**, когда все картинки в разных диапазонах накладываются друг на друга.

Но чтобы поддерживать классификацию галактик, надо выбрать диапазон, который точнее всего передаёт **внешний вид главного населения галактики**, а в центральной области это звёзды. Газ маломассивный, пыль тем более (тысячные доли массы галактики), но пыль может очень сильно менять внешний вид галактики, особенно если она расположена к нам ребром.

На рис. 11.23а показаны три портрета галактики **M101** – в дальнем ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном диапазонах, а на рис. 11.23б ультрафиолетовое изображение **M81** в дальнем ультрафиолете и в ультрафиолете и оптике. Видно, что диск почти без спиральной структуры в оптике и с чёткой спиральной структурой в ультрафиолете.



Рис. 11.23. а) портреты галактики M101 в ультрафиолетовом, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах, б) M81 в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах

Дальше добавим **радиодиапазон** (рис. 11.24а). Светится звёздное тело галактики, а вокруг него линии постоянной поверхностной яркости – эквиденситы. Внешние области не видны в оптике, зато видны в 21 см (нейтральный водород) и показывают более **общий вид галактики** и некоторые её особенности.

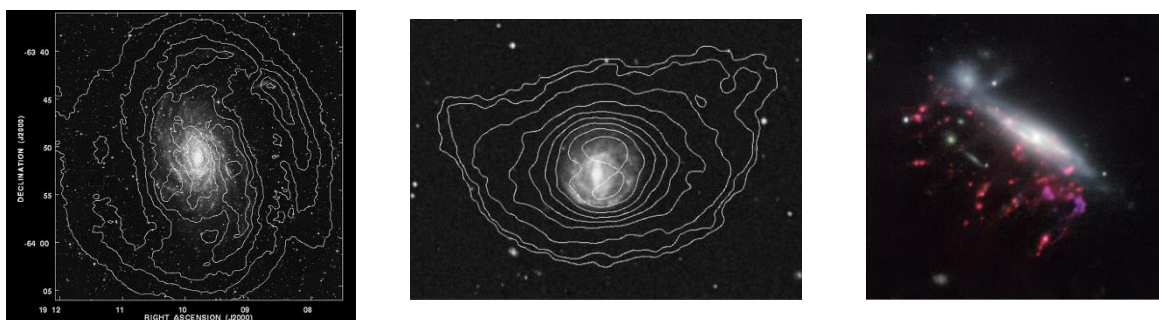


Рис. 11.24. а) более общий вид галактики в радиодиапазоне, б) а) движение галактики по её виду в радиодиапазоне, б) вылет газовых конденсаций из галактики-«медузы»

Например, на рис. 11.24б оптическое тело довольно симметричное, а радио периферия говорит о **динамике**. Галактики летят через разреженную, но всё-таки среду, и данная галактика, скорее всего, движется вниз вправо.

На рис. 11.24в галактика в скоплении, и видно, как из неё **вылетают** в одном направлении **газовые конденсации**. Она летит вверх вправо, и напор межгалактического газа (давление внешней среды) выдувает из неё её собственный. Облака вылетают, в них продолжается звёздообразование.

Сегодня считается, что **инфракрасные снимки галактик наиболее точно передают форму их звёздного тела**. Пыль не так сильно влияет на прохождение инфракрасного света. Вилка Хаббла приобретает третий зубец с **переходными типами** (рис. 11.25а).

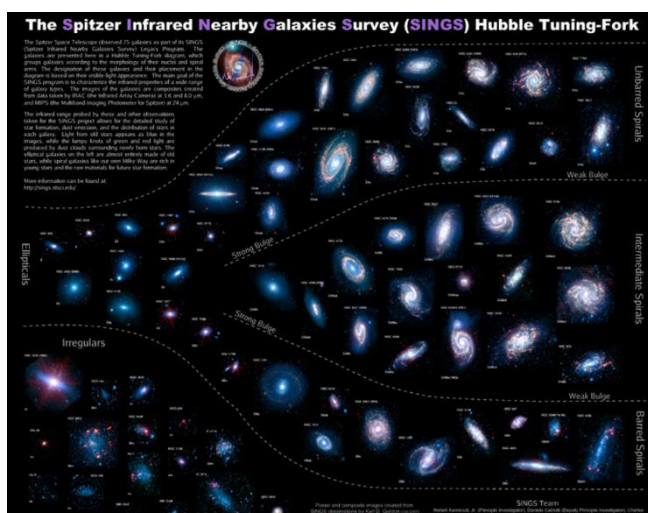
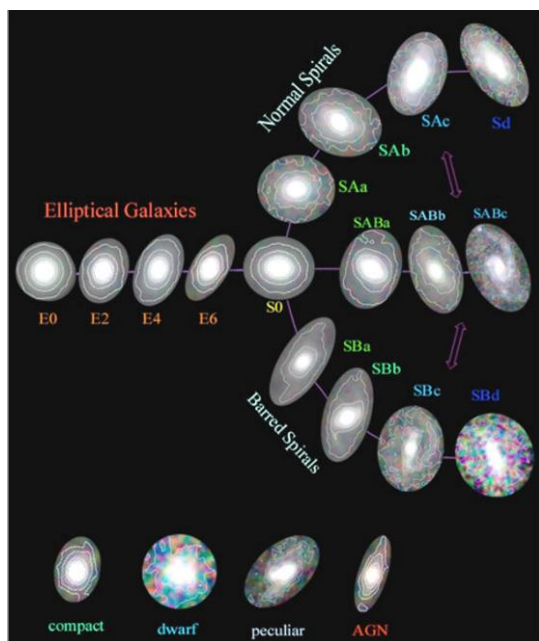


Рис. 11.25. а) морфология галактик в ближнем инфракрасном диапазоне, б) расширенная классификация галактик

Также существуют **усложнённые классификации**, которые содержат много подтипов (рис. 11.25б).

Теперь астрономы понимают, что одна и та же **галактика** в течение своей эволюции **может менять внешность, соотношение дисковой и сфероидальной составляющей** (рис. 11.26).



Рис. 11.26. Изменение цвета галактик по мере их эволюции

Галактики с молодым населением – недавно родившимися горячими звёздами – имеют голубой цвет. А по мере того, как темп звездообразования уменьшается, межзвёздный газ превращается в звёзды, галактика краснеет, то есть там остаются старые маломассивные красные звёзды.

### Динамика галактик

**Форму галактик** надо объяснять. Астрономы пытаются привязать её к движению орбиты, к орбитам звёзд, звёздных населений. Например, галактику Сомбреро можно чётко поделить на два **населения** – первого и второго типа (рис. 11.27а). **Первый тип** – это то, что движется в диске. Как правило, это молодые звёзды и газовые облака, из которых они недавно родились. А население **второго типа** – сфероидальная составляющая, которую можно убрать работой с фотографиями, чтобы увидеть диск (рис. 11.27б)

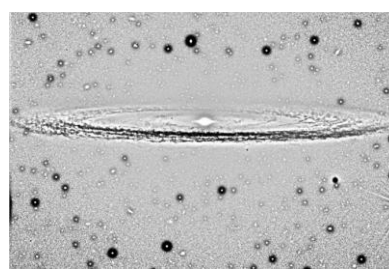


Рис. 11.27. Два населения в галактике Sombrero: исходная (а) и обработанная (б) фотографии

А ещё есть ожидаемое **население третьего типа** – древние звёзды, которые предшествовали двум населением, которые легко наблюдаются сегодня. В нашей Галактике мы постепенно ищем всё менее металличные звёзды, а значит, всё более древние, но пока ни про одну звезду нельзя с полной уверенностью сказать, что она третьего типа населения, в которой вообще нет тяжёлых элементов.

Очевидно, что диск галактики вращается. Астрономы изучают его динамику с помощью **пылевой спектроскопии**: на двумерной поверхности много точек, спектр каждой снимается, вычисляется доплеровский сдвиг линии, и можно нарисовать двумерный портрет галактики. Галактика на рис. 11.28а видна почти с ребра. Цветом показана **скорость**. Центр берётся за нулевую скорость, красные области относительно него удаляются (красное смещение в спектре), а синие приближаются.

Иногда **движение галактики** изображают как на рис. 11.28б. Это негативная фотография. Серым обозначено тело галактики, на которое нанесены **линии постоянной лучевой скорости**. Значит, диск вращается.

Также мы видим спиральную структуру на нём. Но можно ли однозначно решить, **какого типа эти спирали**: лидирующие или отстающие (закручивающиеся или раскручивающиеся)?

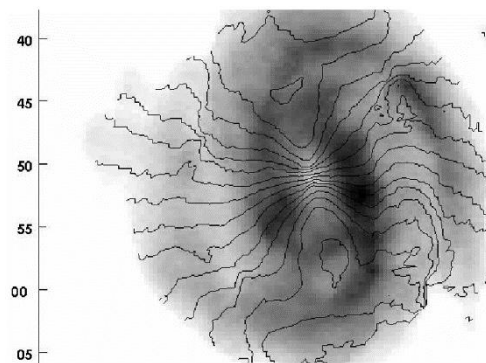
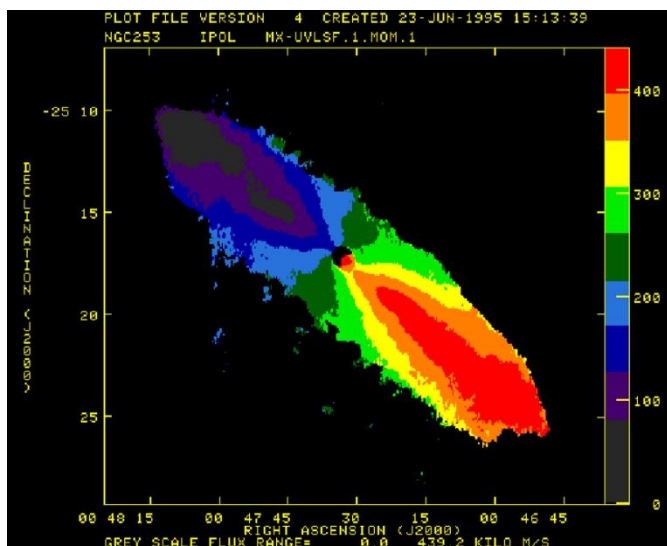


Рис. 11.28. а) распределение скорости галактики, сделанное с помощью пылевой спектроскопии, б) движение галактики на негативной фотографии

В **раскручивающейся** спирали на рис. 11.29 диск вращается как показано стрелкой, внешние концы спирали лидируют, то есть опережают внутреннюю часть спиральных рукавов. А в **закручивающейся** вращение идёт по-другому, и внутренняя часть опережает удалённую.

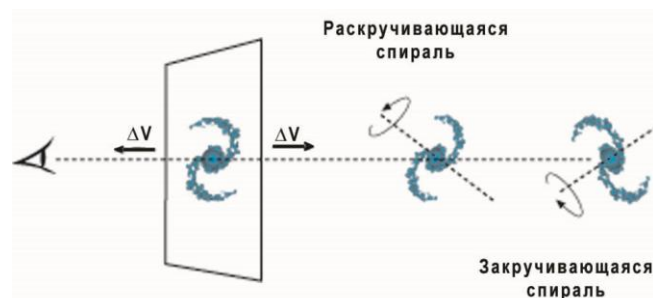


Рис. 11.29. Наблюдение раскручивающейся и закручивающейся спирали галакти

Для теоретиков очень важно понять, как на самом деле устроены спиральные галактики, чтобы создать теорию спиральных структур. А наблюдатель, как правило, смотрит на галактику, видит её проекцию на небесную сферу, понимает, что дальняя сторона приближается, а ближняя удаляется. Но такое может быть в каждом из показанных дальше на рисунке вариантов, а спиральная картина у разных ориентаций разная.

Иногда **определить тип** удаётся. На рис. 11.30а показана галактика **M64**, где очевидно, что передняя часть диска ближе к нам, потому что пылевые облака перекрывают дальний фон. Но если пыли мало, при любой из двух ориентаций, в проекции будет одно и то же изображение диска.

Когда галактика видна с ребра, спиральную структуру увидеть нельзя, но можно **измерить скорость вращения**, ориентируя щель спектрографа вдоль большой оси



изображения галактики (рис. 11.30б). Точки разных концов будут давать разную доплеровскую скорость, и относительно центра галактики каждый край будет двигаться с определённой скоростью. Здесь левый край имеет большую положительную скорость (скорость удаления, расстояние растёт), значит, удаляется от нас, а правый приближается.

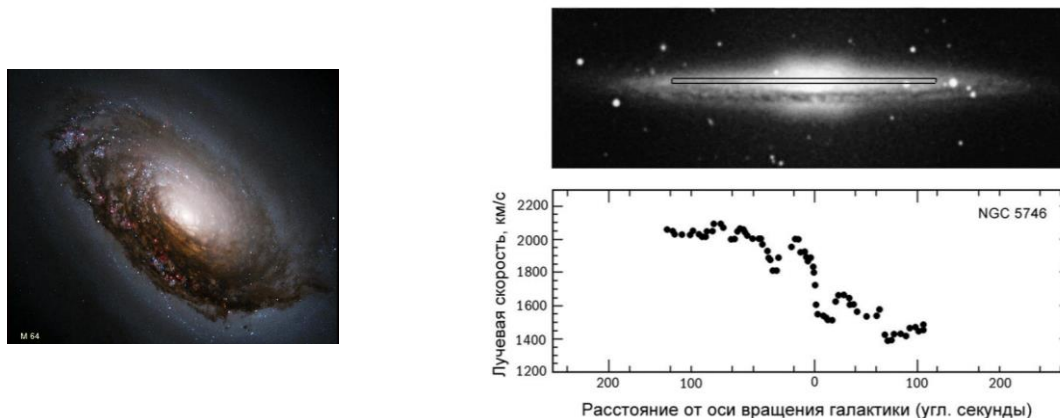


Рис. 11.30. а) галактика М 64, б) измерение скорости вращения галактики NGC 5746, видимой с ребра

К концу 80-х годов накопилось большое количество измерений кривых вращения спиральных галактик, и оказалось, что практически **линейная скорость движения звёзд не меняется с удалением от центра**, особенно у больших галактик Sa (рис. 11.31). Иногда у Sc скорость падает на периферии, но это бывает редко.

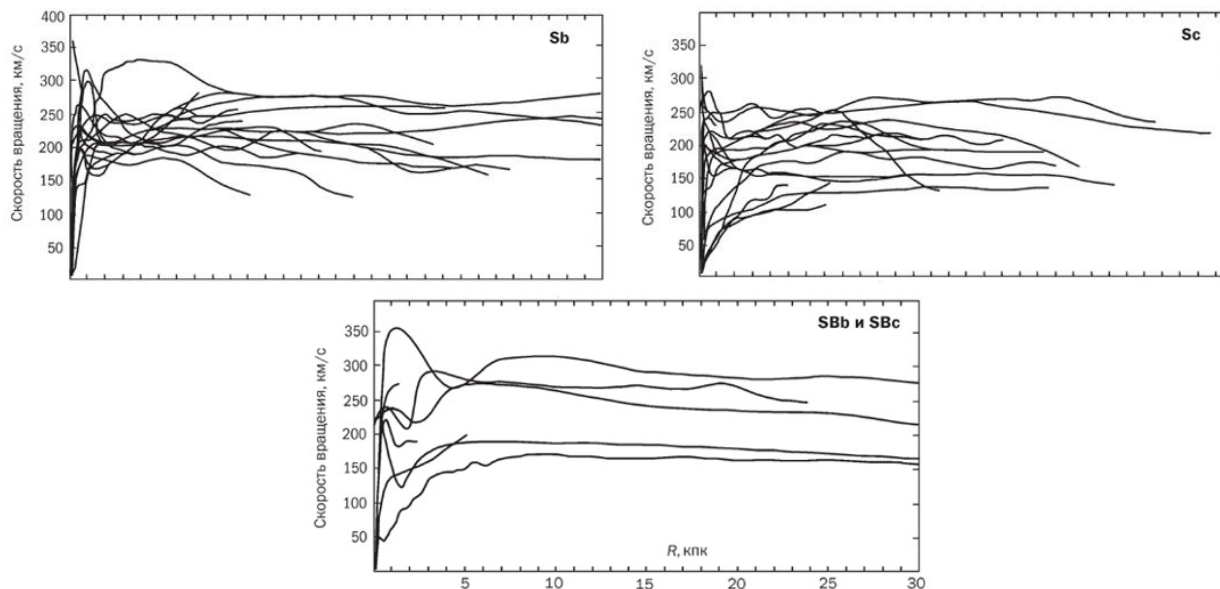


Рис. 11.31. Кривые вращения спиральных галактик

Получается, по мере удаления от центра масса продолжает расти как  $\sqrt{R}$ . Сейчас это объясняют присутствием **тёмной материи (тёмного вещества)**. Она есть и почти в любой крупной галактике, и в мелких. Правильнее говорить вещество, потому что

материя может подразумевать и вещество, и поля излучения, а свет улетел бы оттуда со скоростью света. Природа этого вещества пока непонятна, хотя есть гипотеза, что его составляют необычные нейтрино.

**В нашей Галактике может быть очень массивное гало (рис. 11.32а), потому что наблюдения показывают, что скорость звёзд на периферии может даже нарастать (рис. 11.32б).**

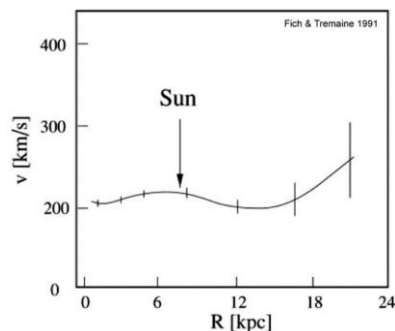
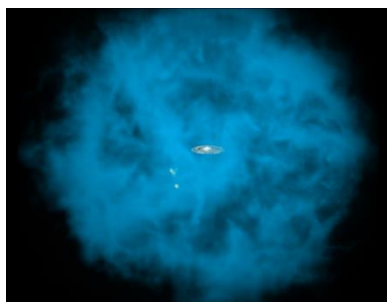


Рис. 11.32. а) тёмная корона галактики, б) кривая вращения Галактики

В 2017 г. на больших телескопах было сделано наблюдение, показавшее, что у **близких галактик тёмное гало присутствует** (рис. 11.33а). На падение кривой скорости к центру внимание не обращаем, это технический эффект. В самом центре нашей галактике, где чёрная дыра превалирует по массе, скорость быстро растёт. А вот у **далёких галактик тёмное гало часто отсутствует.**

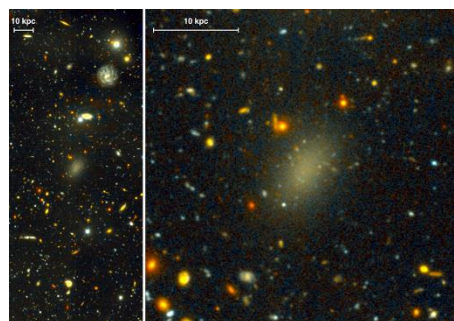
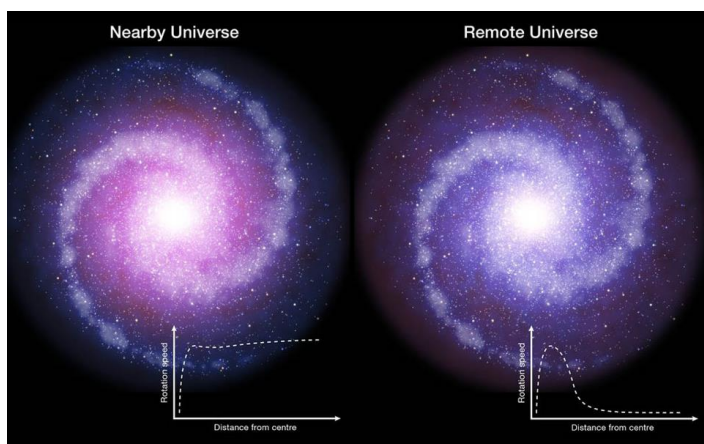


Рис. 11.33. а) кривые скорости для близких и далёких галактик, б) галактика Dragonfly 44, на 99,99% состоящая из тёмной материи

Пока этому только ищут **объяснения**. То ли **тёмное гало постепенно с возрастом концентрируется в галактике** из совсем далёких областей, где нет объектов, по которым можно измерить скорость вращения. Либо там **диск вращается медленно**, потому что он хаотический. Чтобы удерживать звезду на круговой орбите, нужна центробежная сила. Но эта сила может лежать в плоскости вращения диска, а может быть под каким-то углом.

Например, орбиты комет уходят в разные стороны далеко от эклиптики, и вдоль эклиптики у них нет заметной угловой скорости, она заметна в других направлениях. Если диск расширяется, становится более хаотическим, звёзды ориентируют орбиты под разными плоскостями, в среднем их скорость движения в плоскости галактики может быть низкой. Но у далёких галактик сложно определить структуру диска, и пока непонятно, какая гипотеза вернее.

В последнее время оказалось, что **присутствие тёмного вещества не пропорционально количеству светлого**. Иногда мы находим галактики, в которых 99,99% содержится в тёмном веществе, а звёзды удаётся найти с трудом и динамике они роли не играют (рис. 11.33б). И наоборот, обнаруживаются галактики, в которых 90 – 95% массы принадлежит видимым звёздам.

Выяснилось, что почти все галактики, в которых очень мало тёмного вещества, являются **спутниками более крупных** галактик. Получается, более крупная галактика приливными силами содрала с них всё периферийное, осталось только центральное звёздное тело.

А вот почему в галактики, где очень много тёмного вещества, не втекло обычное вещество, почему там не родилось больше звёзд, пока непонятно. Возможно, этого вещества рядом просто не было.

**Объяснение спиральной структуры** требует продвинутой волновой теории. Рассмотрим его в общих чертах. Мы рассматривали разные **законы гравитации** (рис. 11.34а). Самый простой ньютонов закон (нижняя левая картинка) заставляет лёгкое тело крутиться относительно массивной точки по неизменному эллипсу. А если немного модифицировать показатель степени закона гравитации, траектории будут другими.

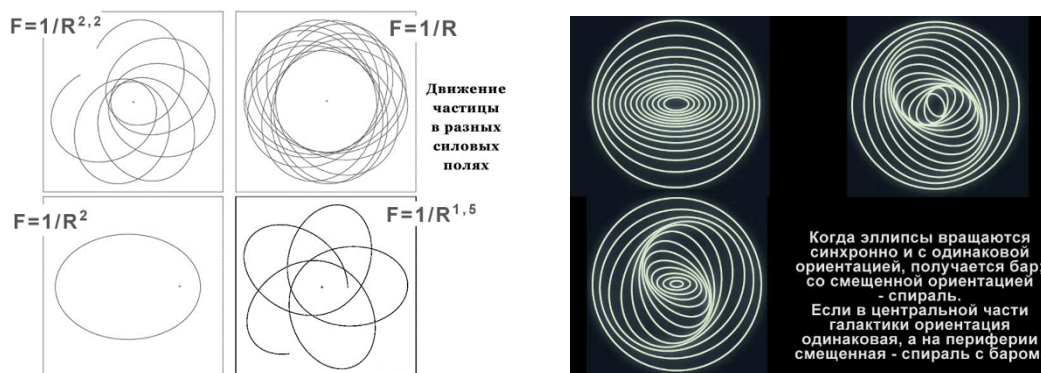


Рис. 11.34. а) движение звёзд в разных силовых полях, б) образование спиральной структуры на диске из эллиптических орбит

Верхний левый закон очень жёсткий, такое в природе может быть в районе чёрных дыр, где гравитация нарастает к центру быстрее, чем в чисто ньютоновом законе. А правые законы более мягкие. **Мягкая гравитация** означает, что вещество распределено в объёме более равномерно, чем если бы всё было собрано в центральной

точке. При удалении от центра масса вещества внутри орбиты нарастает, поэтому сила гравитации спадает медленнее.

Законы с показателями **1–1,5** как раз характерны для галактик. Тогда звёзды движутся по **прецессирующим эллиптическим орбитам** – эллипсам, направление оси которых постоянно меняется (рис. 11.34б). Если направления меняются хаотически, структуры на диске галактики мы не увидим. А если есть взаимная связь между направлениями этих эллипсов, если они каким-то образом притягиваются друг к другу и самоорганизуются, появляются места, где орбиты звёзд немного сближаются в пространстве. Каждая звезда летает по своей эллиптической орбите, однако внешне это **похоже на спиральную структуру**.

Как правило, движение звёзд и газовых облаков по внутренним орбитам догоняет спиральный узор, а по внешним отстаёт. **Звезда просто входит в спиральный узор с внутреннего или внешнего края и дальше выходит из него, продолжая движение по своей орбите** (рис. 11.35а).

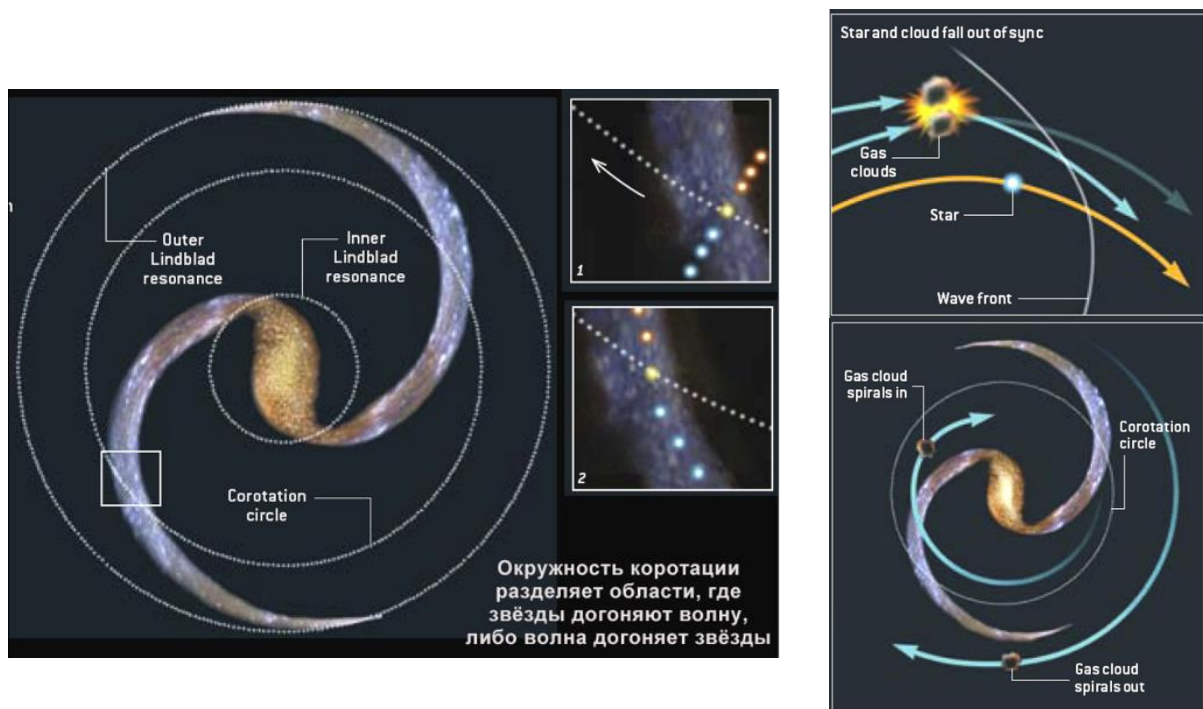


Рис. 11.35. а) вхождение звёзд в спиральный рукав и выхождение из него, б) коагуляция

А газовые облака протяжённые, при сближении траекторий они могут слиться в одно (рис. 11.35б). Поэтому **внутри спиральных рукавов** происходит **коагуляция маленьких облаков** и формирование из них более крупных. В крупных облаках происходит сжатие газовой составляющей, **рождаются звёзды**, которые своим светом отмечают положение спирального рукава.

На рис. 11.36а показана **модель данного процесса**. Запускаем в диск 100 тыс. звёзд и смотрим сверху, как они взаимодействуют. Возникает спиральная структура, но

спустя один-два оборота рассыпается. Видимо, её надо стабилизировать внешним гравитационным потенциалом в виде тёмного вещества.

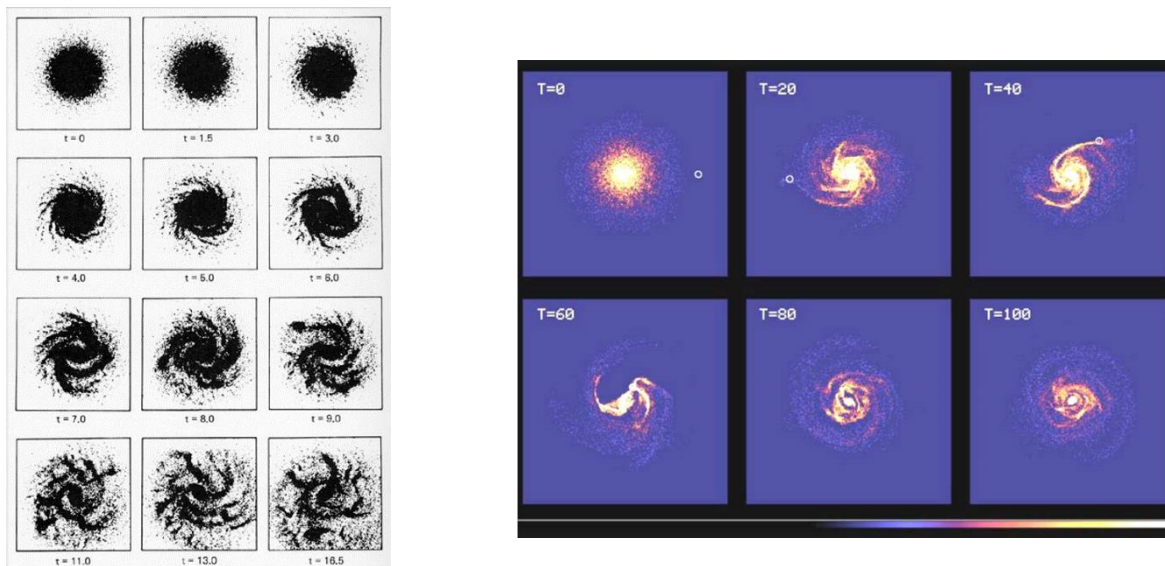


Рис. 11.36. а) модель эволюции дисковой галактики, содержащей звёзды и облака газа, б) модель, показывающая количество оборотов звёзд в галактике

На рис. 11.36б показано количество оборотов, которые делают звёзды на среднем расстоянии от центра. Такие модели живут не очень долго.

Модель со звёздами и газовыми облаками на рис. 11.37 показывает, как спиральные галактики могут переходить из одного типа в другой. Когда её запустили, сначала образовалась спиральная галактика с баром, потом стала галактикой без бара, дальше вернула его и потеряла вновь.

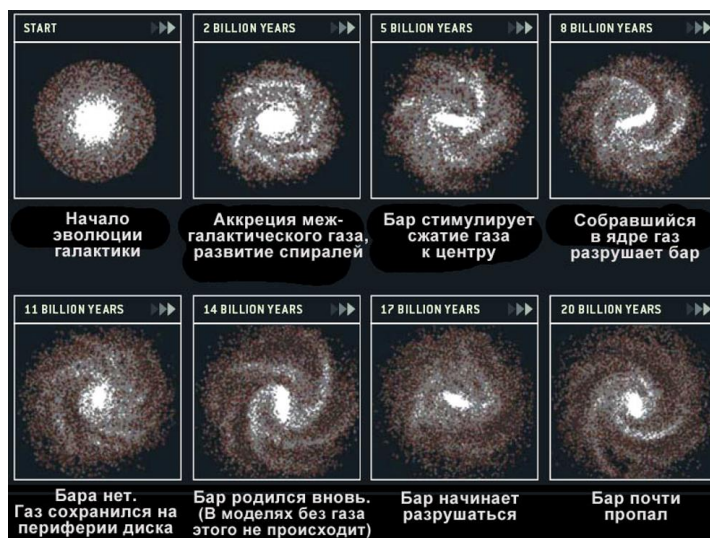


Рис. 11.37. Модель, показывающая переход галактик из одного типа в другой

Также создаются модели, показывающие, что происходит при сближении и объединении галактик (11.38а). На рис. 11.38б фотография такого процесса.

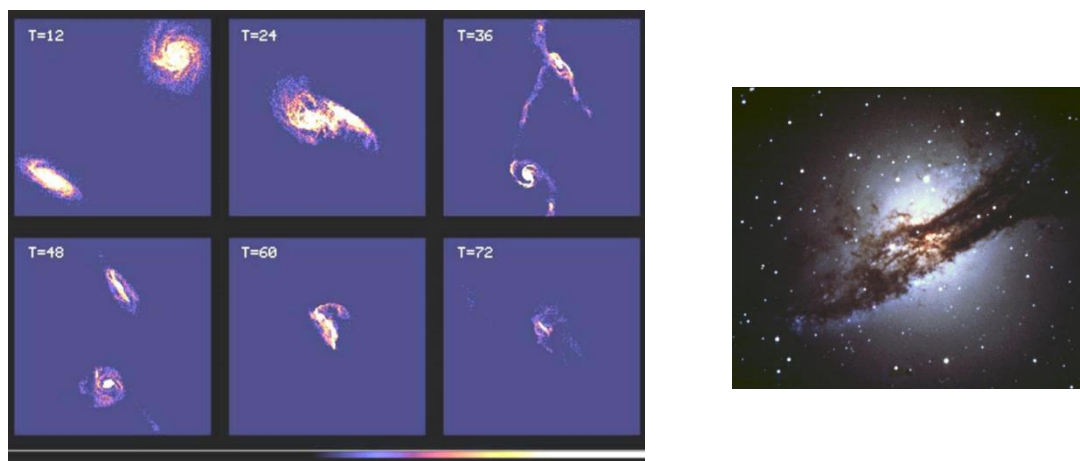


Рис. 11.38. Модель объединения галактик (а) и фотография данного процесса (б)

Есть **галактики с активными ядрами**, в которых находятся чёрные дыры. Из окрестностей чёрной дыры выбрасываются мощные **релятивистские джеты**, и их энергетика может быть такой большой, что они сильно влияют на форму галактики (рис. 11.39а). У некоторых активных галактик чёрная дыра вообще выдувает межзвёздное вещество.

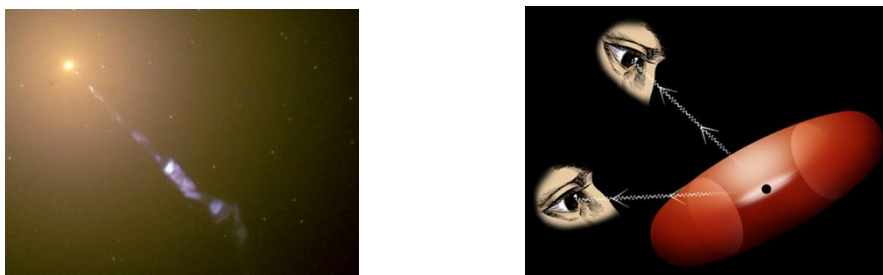


Рис. 11.39. а) релятивистский джет в галактике с чёрной дырой в центре, б) наблюдение галактик с активными ядрами

Сегодня астрономы пытаются создать **стандартную модель активных ядер галактик**, то есть подвести все активные галактики под универсальную схему. Считается, что в центре любой активной галактики находится чёрная дыра, её окружает аккреционный диск (тор), и мы просто смотрим на это под разными углами и поэтому видим **разные типы активности** (рис. 11.39б). Нижний наблюдатель со своего ракурса тогда вообще не увидит чёрную дыру через вещество, а верхний увидит только яркий центральный аккреционный диск, но не увидит тора, где иногда рождаются звёзды.

Но, скорее всего, такие рассуждения тоже являются ошибкой, похоже на ошибку Хаббла, пытавшегося описать все галактики простой схемой. Типы активности могут быть разные, да и **активные ядра** можно иногда объяснить без чёрной дыры – например, массовым рождением звёзд, вспышками сверхновых и т. д., и численно тоже будет сходиться.

## Лекция 12. Крупномасштабная структура галактик

### Группы и скопления галактик

Сначала поговорим о группах. **Местная группа галактик** (Local group) состоит из двух больших и большого количества мелких галактик (рис. 12.1). **Наша Галактика** и **Андромеда** примерно равной массы. Диаметр местной группы около 3 Мпк, за этими пределами начинается антигравитационное влияние тёмной энергии, и никакие объекты, находящиеся там, не удержатся рядом с центральными.

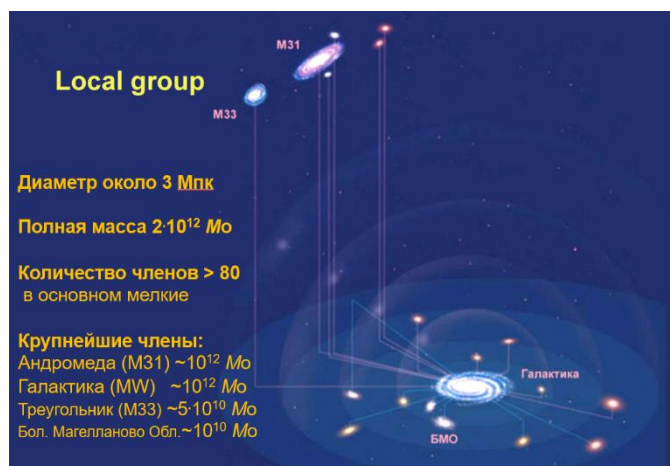


Рис. 12.1. Местная группа галактик

Но ближе они удерживаются. У нашей Галактики сегодня насчитывается около **60 спутников**. У Андромеды пока известно меньше, скорее всего, потому что самые мелкие ещё не обнаружили.

На рис. 12.2 представлены **крупнейшие спутники нашей Галактики**. Самый большой – Большое Магелланово Облако, за ним идёт Малое Магелланово Облако и похожие на него неправильные и карликовые эллиптические системы.

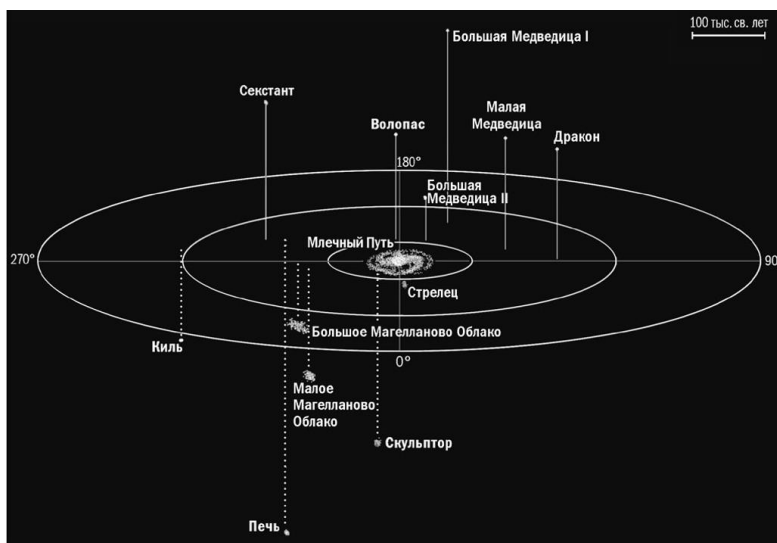


Рис. 12.2. Спутники Млечного Пути

На рис. 12.3а фотография **Большого Магелланова Облака**. Масса этой галактики примерно в 20 раз меньше массы нашей Галактики, а количество межзвёздного газа примерно такое же. Она постепенно тормозится и приближается к центру нашей Галактики, значит, скоро упадёт на неё и принесёт с собой примерно такое же количество межзвёздного газа, сколько сегодня осталось в нашей звёздной системе. Тогда темп звёздообразования в конгломерате двух галактик усилится вдвое или даже больше.



Рис. 12.3. а) Большое Магелланово Облако, б) карликовая неправильная галактика Leo A, в) неправильная галактика магелланова типа NGC 6822

Сейчас **темп звёздообразования** в Большом Магеллановом облаке примерно такой же, как в нашей Галактике, а иногда астрономы находят в его внешней части более молодые, более массивные звёзды. В нижней части рис. 12.3а видна гигантская звёздно-газовая конденсация. Само яркое тело – туманность Тарантул. Там находятся самые крупные звёзды из всех обнаруженных астрономами, их масса доходит до 50 масс Солнца.

Остальные спутники нашей Галактики не такие крупные. На рис. 12.3б показан типичный пример неправильной галактики, почти лишённой межзвёздной среды.

А у другого нашего спутника, изображённого на рис. 12.3в, её **много**, и здесь звёздообразование идёт в довольно высоком темпе. Непонятно, как такие маленькие системы смогли сохранить такое количество межзвёздной среды, при том, что в некоторых таких галактиках звёзды начали конденсироваться из неё только недавно.

На карте всего неба Млечный Путь идёт по экватору, но довольно неплохо проглядываются Большое и Малое Магеллановы Облака, а также Андромеда, хотя она находится дальше и видна не так ярко (рис. 12.4). Эти три галактики можно увидеть на небе невооружённым глазом.

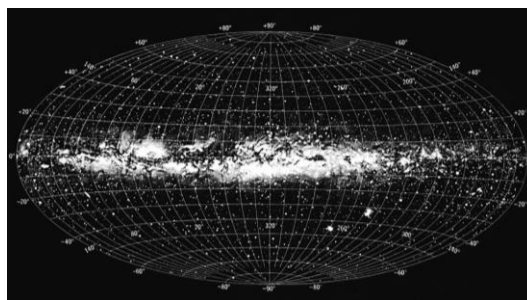


Рис. 12.4. Галактики на панораме Млечного Пути



На рис. 12.5а показана фотография **Большого и Малого Магеллановых облаков**. Отметим, что основное тело, которое мы обычно и называем галактикой БМО, им не ограничивается. Снимки с большой экспозицией показывают довольно обширную область, окружающую барообразное тело, заполненную газом и молодыми звёздами, принадлежащими к этой галактике (рис. 12.5б).



Рис. 12.5. а) Большое и Малое Магеллановы Облака, б) снимок Большого Магелланова Облака с большой экспозицией, в) Малое Магелланово Облако

Некоторые считают, что от концов бара отходят спиральные рукава, но нельзя сказать, что они чётко обозначены. Один рукав прижат к бару, другой раскрывается быстрее, так что, если бы БМО назвали спиральной галактикой, определить её тип было невозможно. Поэтому галактики с намёком на бар и спиральную структуру, а также с большими областями звездообразования, которые сильно меняют видимую морфологию данной системы, выделены в отдельный тип – **неправильные галактики Магелланова типа**.

**Малое Магелланово Облако** значительно менее массивное и содержит меньше газа (рис. 12.5в).

БМО и ММО, по-видимому, когда-то составляли двойную систему. Сегодня они движутся мимо нашей Галактики, и трудно сказать, по какой орбите – эллиптической и гиперболической, то есть сложно определить, они одновременно пролетают мимо неё или совершают вокруг неё циркулярное движение. Судя по всему, это был пролёт, но теперь движение Магеллановых Облаков выходит на **эллиптическую орбиту** – они притормозились за счёт приливного влияния нашей системы (рис. 12.6а). Скорее всего, через несколько оборотов они смешаются с диском нашей Галактики.

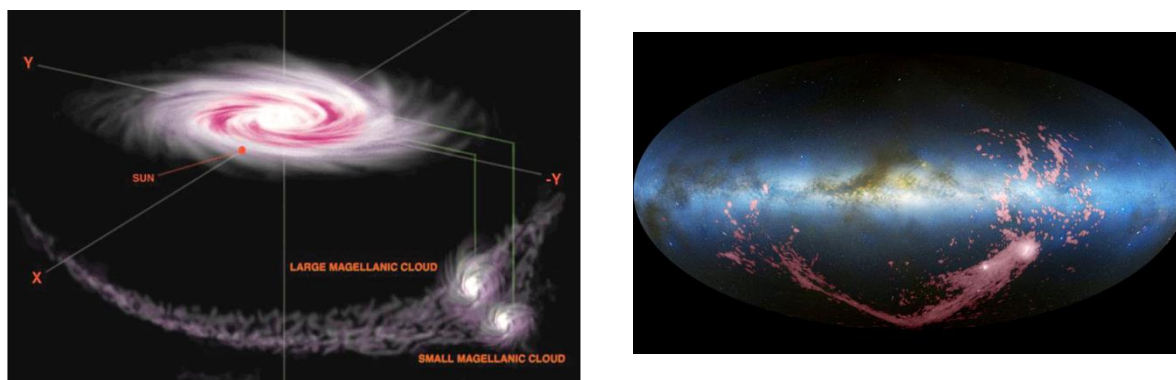


Рис. 12.6. а) Пролёт БМО и ММО, б) Магелланов поток

Если наложить на оптическую карту неба **радиокарту**, мы увидим, что от БМО и ММО тянется обширный хвост из нейтрального водорода (на рис. 12.6б карта линий нейтрального водорода, 21 см). Возможно, эта структура даже замыкается, но по крайней мере, половину неба собой покрывает. Это **Магелланов поток** – скорее всего, результат приливного разрушения БМО.

На рис. 12.7а представлена **совокупность спутников вокруг нашей Галактики**. Открыть все её спутники довольно трудно, потому что многие видны в проекции на галактический диск, а там много межзвёздного вещества, пыли, которая затрудняет оптические наблюдения. Но инфракрасные и радионаблюдения понемногу выделяют скрытые для оптического телескопа системы.



Рис. 12.7. а) крупнейшие спутники Млечного Пути, б) галактика Андромеда на небе

На рис. 12.7б показано, как найти на небе галактику **Андромеда (M31)**, видя созвездие Пегас. Невооружённым глазом можно разглядеть только яркую центральную часть балджа, диск почти не виден. Если симметрично посмотреть в другую сторону, то на очень тёмном небе в очень хороших условиях можно заметить галактику M33.

Если бы наши глаза были более чувствительны к слабому свету, мы бы видели Андромеду такого размера, как на рис. 12.8а. Для масштаба на нём изображена Луна. Протяжённость эллиптического тела Андромеды по большой оси примерно 6 градусов. А если с помощью радионаблюдений увидеть её самые периферийные части, она займёт 12 градусов.



Рис. 12.8. а) галактика Андромеда со спутниками и Луна в одном масштабе, б) NGC 205 (M110), в) M32

Также на рис. 12.8а видны два **крупнейших спутника Андромеды** – NGC 205 (M110) и M32. Галактика **NGC 205** сильно деформирована сильным влиянием гигантской соседней галактики, на хороших фотографиях видны два приливных выступа (рис. 12.8б). Это небольшая эллиптическая система, она обозначается dE6 – карликовая эллиптическая предельно сжатая галактика.

Вторая галактика, **M32**, ещё более тесно прижата к Андромеде (рис. 12.8в). По сути, это ядро существовавшей в прошлом довольно массивной системы. Это очевидно, потому что у неё плотная яркая часть и никакой периферии.

На рис. 12.9 показана **связь между содержанием металлов в звёздах** какой-либо галактики. Обычно чем больше металлов, тем массивнее галактика, потому что звёзды предыдущих поколений, выбрасывая своё вещество, обогащённое металлами, не смогли выбросить его за пределы галактики. Большая система не выпускает газ из себя, поэтому следующие поколения звёзд рождались из более насыщенного металлами вещества.

Но из этой связи выпадает галактика M32. Её масса (светимость) небольшая, а металличность звёзд в ней высокая. Надо было понять, **куда ушла масса**.

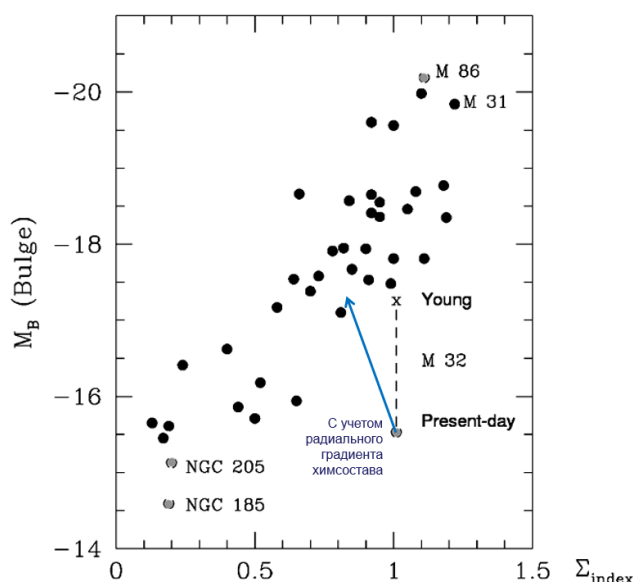


Рис. 12.9. Зависимость масса – металличность для разных галактик, M32 поднимается в общую зависимость

Мы уже рассматривали, как движется и приближается к центру более массивной системы галактика под действием динамического трения. Оказалось, что для M32 можно построить **эволюцию её орбиты вперёд по времени** (рис. 12.10а). У неё эллиптическая орбита, поэтому чередуются апоцентр и перицентр, но динамическое трение всё время приближает галактику к центру туманности Андромеды, и она постепенно разрушается там приливными силами.

Но этот же расчёт можно сделать и **обратно по времени** и посмотреть, откуда она могла стартовать 10–15 миллиардов лет назад (рис. 12.10б). Выяснилось, что она

стартовала с довольно большого расстояния – более 40 кпк – при том, что сегодня её от центра М31 сегодня отделяет всего несколько кпк. Соответственно, её масса могла быть больше, и, приближаясь к центру более массивной звёздной системы и **теряя звёзды со своей периферии**, галактика уменьшала свою массу.

Следуя этой гипотезе, её можно поднять так, что она почти достигнет общей связи между химическим составом звёзд и массой галактики (рис. 12.9, серый крест).

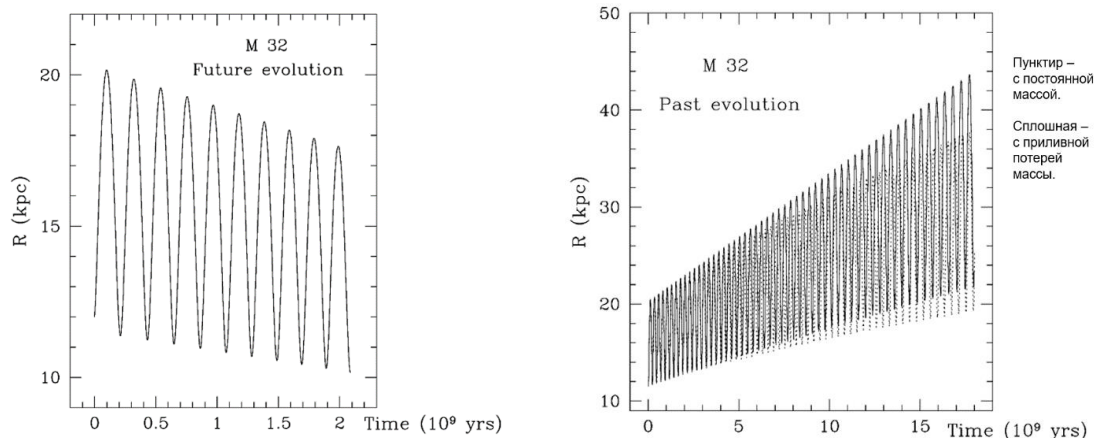


Рис. 12.10. а) эволюция орбиты галактики М32 вперёд (а) и назад (б) во времени

Но ещё мы не учли, что **на периферии** любой галактики **звёзды менее металличны**, чем в центре, потому что газ, сброшенный предыдущими поколениями звёзд, падает к центру и обогащает звёзды, которые там рождаются. Если учесть градиент металличности от центра к периферии, можно понять, что средняя металличность М32 в период её молодости была меньше (синяя стрелка на рис. 12.9). Тогда она хорошо попадает на общую зависимость.

У Андромеды есть ещё **менее крупные спутники**, но они на далёкой периферии, до их динамической эволюции пройдёт ещё много времени (рис. 12.11).

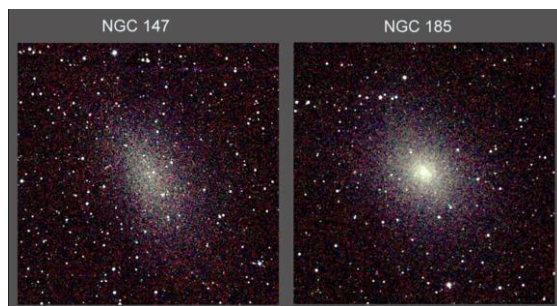


Рис. 12.11. Карликовые сфероидальные галактики – спутники Туманности Андромеды

На рис. 12.12а показаны **крупнейшие спутники системы Андромеда**. Отдельный вопрос, что такое **М33** – спираль в Треугольнике. Астрономы пока не знают, связана ли она гравитационно с Андромедой или живёт в Местной Группе сама по себе. Внешне она похожа на нормальную спиральную систему (рис. 12.12б). Её масса в десятки раз меньше, чем массы нашей Галактики и Андромеды. Это самая маленькая из

известных спиральных галактик, и возможно, что это предельно малая масса для галактик такого типа.

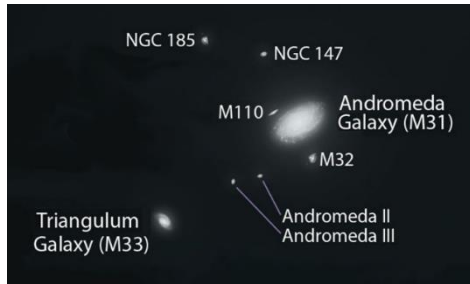


Рис. 12.12. а) крупнейшие спутники галактики Андромеда, б) галактика М33

**Общая масса Местной группы галактик** – сумма масс нашей Галактики и Андромеды, примерно  $(2,3 \pm 0,6) \cdot 10^{12}$  масс Солнца. **Отношение массы к светимости** в Местной группе очень большое:  $44 \pm 12$  в единицах массы и светимости Солнца. Это говорит о том, что кроме звёздного населения в обеих галактиках, в пространстве между ними может быть какое-то невидимое вещество – тёмная материя.

На рис. 12.13 представлена квазитрёхмерная картинка Местной Группы.

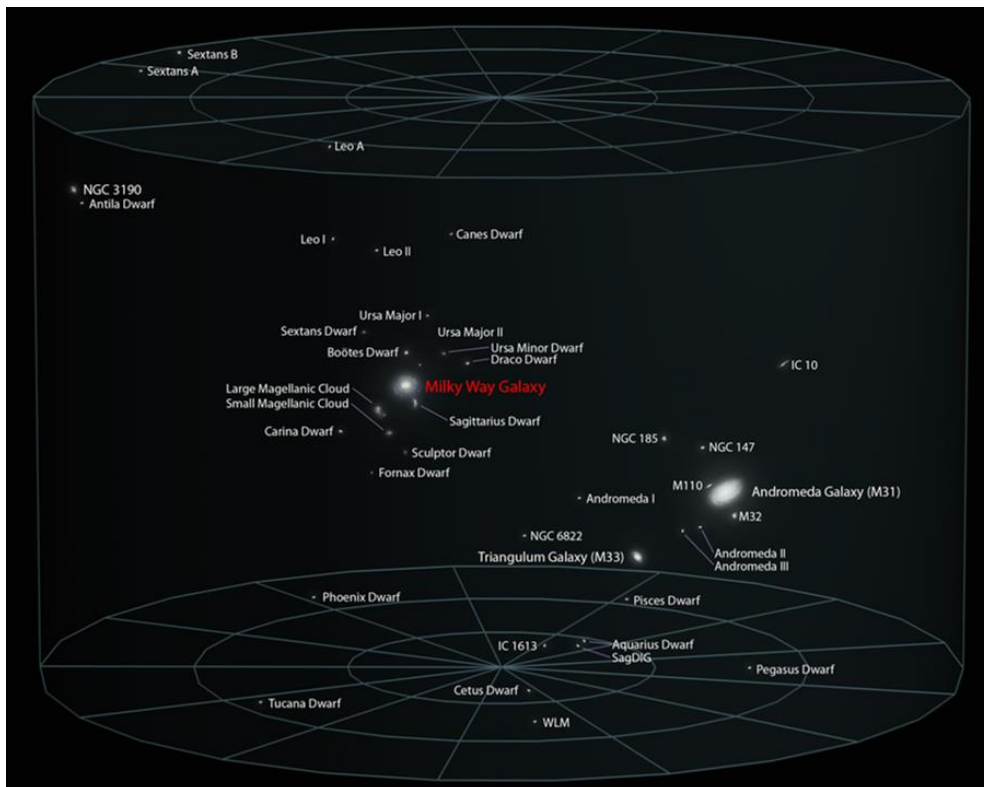


Рис. 12.13. Квазитрёхмерная картина Местной группы галактик

Теперь рассмотрим будущее галактик Местной группы. **Спутники** постепенно падают на свои материнские системы. А **будущее нашей Галактики и Андромеды** можно попытаться вычислить динамическими методами.

Мы очень точно знаем **радиальную скорость Андромеды** и с некоторой ошибкой **трансверсальную**, то есть перпендикулярную нашему лучу зрения, поэтому можно рассчитать её орбиту (рис. 12.14а). Радиальная скорость 300 км/с относительно Солнца и примерно 120 км/с относительно центра нашей Галактики, они сближаются. Через 4 млрд лет произойдёт близкий пролёт их друг рядом с другом, приливный эффект их сильно затормозит, и ещё через 2 млрд лет они уже будут сливаться.

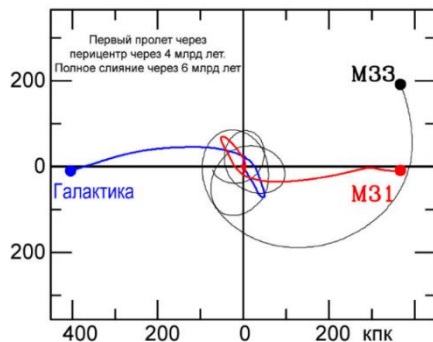


Рис. 12.14. (а) модель слияния Галактики с Туманностью Андромеды, б) изображение начала слияния

На рис. 12.14б изображён предполагаемый момент начала **слияния** этих двух Галактик. А недавно был сделан точный расчёт.

В **динамической модели** учитывалось поведение звёзд и газа в последние сотни миллионов лет, оставшиеся до слияния двух галактик. Сначала они сближаются и разлетаются, при этом довольно сильно деформировав друг друга. Во второй фазе сближения они уже далеко не разлетятся, потому что произойдёт очень интенсивное слияние. Ядра ещё некоторое время будут жить в общей оболочке, а потом сольются, и вместо двух спиральных галактик получится одна аморфная система.

Теперь перейдём к **другим группам галактик**. Ближайшая к нам объединяет галактики **M81 и M82** (рис. 12.15а).



Рис. 12.15. а) галактики M81 и M82, б) галактика M81, в) галактика M82

Первая галактика больше, вторая меньше. M81 – классическая спираль (рис. 12.15б), M82 имеет непонятную морфологию (рис. 12.15в).

Первая причина этого – то, что мы видим её с ребра, а вторая – происходящие в ней процессы. Её когда-то называли **взрывающейся галактикой**, потому что из неё вырываются мощные потоки газа. Теперь стала понятна причина такого поведения.

На рис. 12.16б слева представлена оптическая фотография данной группы галактик, а справа радиоизображение в 21 см, нейтральный водород. Видно, что эти галактики **обмениваются веществом**. Также на данном изображении можно заметить ещё одну небольшую систему, третий член этой группы.



Рис. 12.16а. Фотографии галактик М 81 и М 82 в оптическом и рентгеновском диапазонах, б) струи газа в диапазоне оптика + ИК, в) горячий газ в диапазоне оптика + ИК + рентген

Вещество, попадающее с более крупной галактики на более мелкую, включилось в **активное звёздообразование**. На рис. 12.16б на оптику наложен инфракрасный портрет. Видно, как вырываются **струи газа**. На рис. 12.16в поверх всего ещё наложен рентгеновский портрет. Раз газ светится в рентгеновском диапазоне, значит, он горячий. Похоже, что два мощных потока горячего газа вырываются из центральной области в двух направлениях перпендикулярно диску. В этом почти полная аналогия с нашей Галактикой, где мы видим пузыри Ферми, вздымающиеся над галактическим диском в обе стороны.

Общая картина эволюции таких тесных систем – слияние, **гиганты поглощают карликов** (рис. 12.17а).

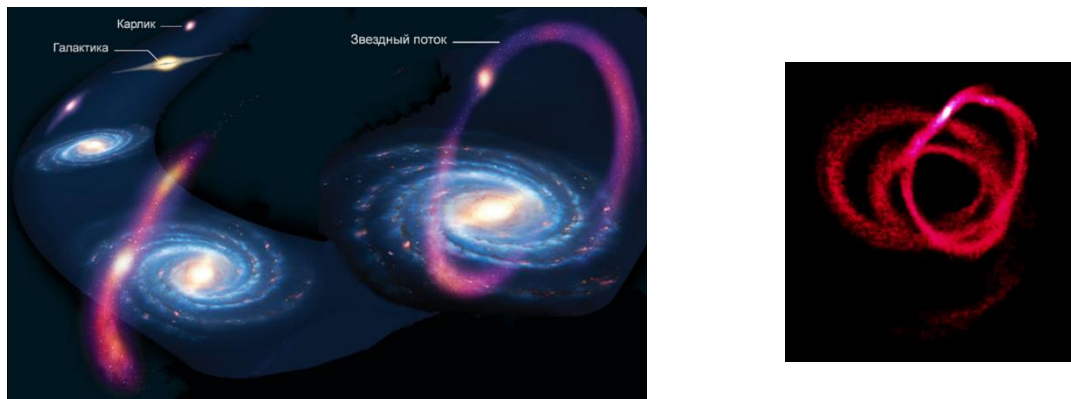


Рис. 12.17. а) приливное разрушение карликовой галактики-спутника Млечного Пути, б) модель разрушения спутника гравитацией центральной галактики

Также был сделан **расчёт для спутника**, который разрушается под влиянием гравитации большой галактики. Он постепенно приближается к центру галактики, его ядро долго сохраняется, но периферийные звёзды формируют звёздно-газовые потоки. В конце концов от спутника почти ничего не остаётся. Однако удивительна сложная

динамика движения этого спутника (рис. 12.17б). Он движется не по эллипсу, потому что центральная галактика не сферически симметрична.

Структура **звёздных потоков** многое рассказывает о гравитационном поле центральной галактики. Наша система тоже окружена несколькими десятками звёздных потоков (рис. 12.18а). Это означает, что несколько спутников нашей Галактики сравнительно недавно разрушились, оставшиеся от них звёздные потоки пока ещё можно выделить на фоне галактического гало и по ним попытаться восстановить структуру разрушенных спутников.



Рис. 12.18. а) звёздные потоки в Галактике, б) звёздные потоки в соседней галактике, в) оболочки звёзд, окутывающие центральную галактику

На рис. 12.18б показана одна из соседних нашей внешних галактик, видимая с ребра. Здесь звёздные потоки ещё достаточно плотные, и их можно видеть на фотографии без обработки. На рис. 12.18в ещё один пример того, как, разрушаясь, спутник окутывает центральную галактику **оболочками звёзд**.

**Квинтет Стефана** – довольно известная группа галактик (рис. 12.19а). Она была обнаружена Э. Стефаном в 1877 г. Она так называется, потому что формально в ней можно насчитать пять крупных систем. Правда, пятая голубая галактика случайно видна в проекции, это более близкая к нам система. А остальные **четыре** действительно соседние, нижние две сейчас сливаются, а у верхних двух, судя по виду спиральных рукавов, содержащих явно приливные выбросы, слияние заканчивается.



Рис. 12.19. а) Квинтет Стефана, б) две сливающиеся галактики

На хороших кадрах видны потоки газа, внутри которых формируются звёзды и звёздные комплексы, а также приливные выбросы, внутри которых идёт звездообразование.



Когда сближаются две почти одинаковые системы, сложно сказать, кто кого поглощает (рис. 12.19б). Они просто сближаются, сливаются и становятся единой системой.

Первый морфологический каталог взаимодействующих галактик был составлен Б. А. Воронцовым-Вельяминовым. Пару галактик, изображённую на рис. 12.20а, он назвал «Мышки». Здесь ещё видны две отдельные галактики, приливно деформировавшие друг друга. А на рис. 12.20б пара галактик демонстрирует следующий этап слияния. Уже трудно сказать, где какая галактика, но приливные хвосты ещё остались.



Рис. 12.20. а) взаимодействующие галактики NGC 4676 («Мышки»), б) более сильно слившиеся галактики, в) области звездообразования в сливающихся галактиках «Антенны»

На сегодняшний день существует множество моделей слияния галактик. На них видно, что ядра галактик быстро объединяются, и у звёздного конгломерата формируется одно ядро, система фактически становится одной галактикой.

Пару взаимодействующих галактик, показанную на рис. 12.20в, Воронцов-Вельяминов назвал «Антенны». В каждой из них в центральной части возникли яркие голубые комплексы звездообразования. Такого взрыва формирования звёзд не наблюдается ни в одной одиночной галактике. А когда они сливаются, и газовые облака обеих галактик сталкиваются с большой скоростью, уплотняются в ударных волнах, стимулируется рождение новых звёзд.

### Скопления и сверхскопления галактик

Если рассмотреть больший масштаб (рис. 12.21), можно увидеть, что рядом с нашей группой расположены группы M81 – M82 и другие похожие, а дальше в направлении созвездия Дева находится довольно крупное скопление (рис. 12.22а). Его уже нельзя назвать группой, в него входит более 1,5 тыс. крупных и множество мелких галактик. Среди них довольно много объектов каталога Мессье.

Всё, рассмотренное выше, организовано в ещё более крупную структуру. Группы и скопления галактик можно назвать сверхскоплением галактик. Его центром, самой крупной группой является Дева, но ещё несколько групп и скоплений составляют почти линейную структуру.

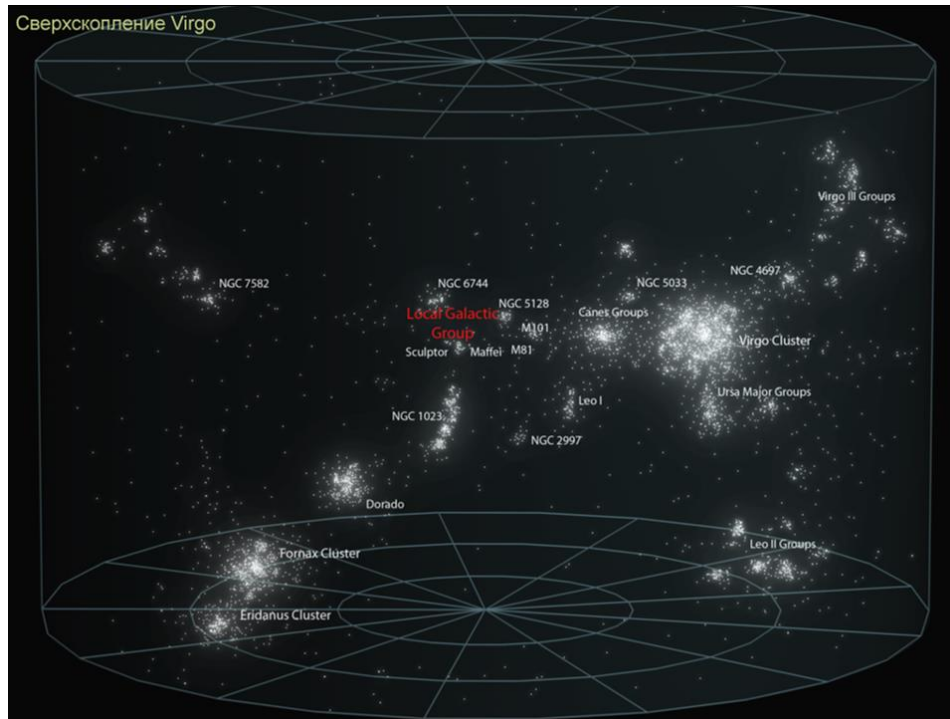


Рис. 12.21. Скопления галактик вокруг Галактики

В современных каталогах скоплений галактик более **10 тыс. членов**. При таком разнообразии объектов надо проводить **морфологическую классификацию**. В первом приближении все скопления можно разделить на правильные и неправильные.



Рис. 12.22. а) скопление галактик в Деве, б) скопление галактик в Геркулесе

**Правильные скопления** более-менее шарообразной формы, плотные, с ярким выделенным плотным центром и более разреженной периферией, чем-то напоминающие шаровые звёздные скопления. А у **неправильных скоплений**, например, скопления галактик в Геркулесе (рис. 12.22б) нет структуры, просто случайно разбросано не очень большое количество крупных и большое количество мелких галактик.

Наблюдения в рентгеновском диапазоне, который чувствителен только к очень горячему газу, показали, что весь объём любого крупного скопления галактик заполнен межгалактическим газом. Он очень разреженный, но объём большой, и по массе **межгалактический газ превосходит суммарную массу звёздных тел галактик**. То есть

на самом деле скопления галактик – это большое количество разреженного газа с температурой 20–100 млн К, и по массе это главная составляющая барионного вещества.

На рис. 12.23а показано довольно крупное **скопление галактик** (более тысячи) в **Персее**. Здесь выделяется галактика **Персей А**, в центре которой гигантская чёрная дыра. Даже на оптических фотографиях видно, что она проявляет очень сильную активность. Но если наложить на оптику рентгеновский портрет данной области, можно понять, что именно она нагревает весь межгалактический газ.

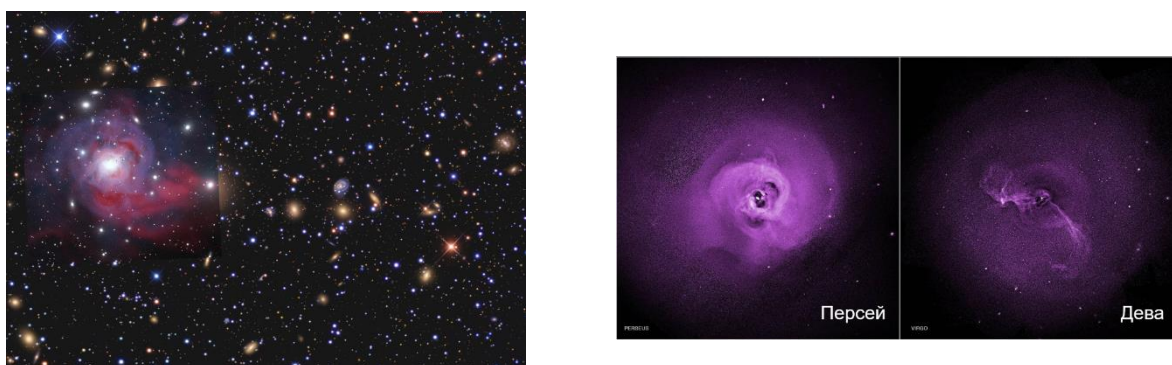


Рис. 12.23. а) скопление галактик в Персее, б) рентгеновские изображения скоплений в Персее и в Деве

**Рентгеновские портреты скоплений в Персее и в Деве** (рис. 12.23б) показывают, что источником энергии межгалактического газа, который нагрет до  $10^8$  К, является центральная область одной галактики. Это удивительно, учитывая, что размер скопления галактик Мпк, а размер аккреционного диска вокруг чёрной дыры всего около 1 пк.

### Расстояния и движение галактик

Мы уже говорили о разных методах определения расстояний. Раньше казалось, что можно использовать **метод стандартного отрезка** (рис. 12.24), то есть находить объекты стандартного линейного размера внутри галактик. Например, области горячего газа, в том числе водорода, или звёздные скопления. Но данный метод плохо себя оправдал.

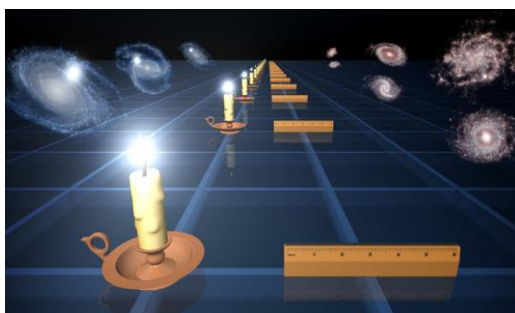


Рис. 12.24. Методы стандартной свечи и стандартного отрезка

А **метод стандартной свечи** стал почти основным для измерения межгалактических расстояний (рис. 12.24). Если мы нашли какой-то объект, светимость

которого априорно известна заранее по неким наблюдаемым свойствам, то по блеску этого объекта можно определить расстояние.

На рис. 12.25 показано, как строится **шкала космических расстояний**. Иногда её называют **лестницей** космических расстояний, потому что она опирается на нижних ступенях на самые надёжные параллактические, тригонометрические методы измерения расстояний до звёзд. Но даже с современными астрометрическими спутниками они работают на не очень больших расстояниях (несколько кпк).



Рис. 12.25. Шкала (лестница) космических расстояний

А дальше на основе этих методов развиваются другие. Каждый из них опирается на предыдущий. Даже если предыдущие методы точны, с увеличением расстояния точность измерения теряется, потому что накапливаются ошибки всех предыдущих методов.

Пожалуй, самый дальнобойный метод – это **метод гравитационного линзирования** (рис. 12.26).



Рис. 12.26. Гравитационные линзы Солнце (а) и галактика (б)

Мы знаем, что массивное тело искривляет путь светового луча. Если какое-то массивное тело на переднем фоне, то объект заднего фона будет виден как искажённое изображение неправильно работающей гравитационной линзы. Вместо одного чёткого объекта мы увидим **размытую или разделённую на части картину**.

Если гравитационная линза, то есть массивный объект, симметричная, и точно на оси, соединяющей её центр и наблюдателя, лежит яркий далёкий объект, этот объект будет в виде **кольца Хвольсона-Эйнштейна** (рис. 12.27а).

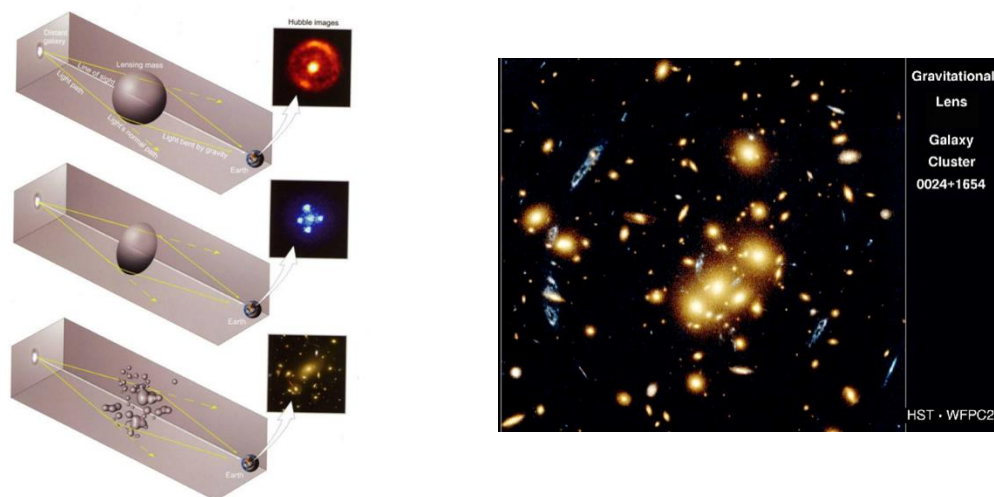


Рис. 12.27. а) изображения далёких объектов через гравитационные линзы разного «качества», б) изображение далёкой системы через скопление галактик

Но скопление галактик – хаотическая структура, и ожидать такого чёткого изображения в гравитационной линзе мы не можем. Как правило, получается искажённое изображение.

На рис. 12.27б один из примеров. Сквозь скопление галактик видна далёкая лежащая за ним голубая система, по-видимому, спираль с большим количеством ярких звёзд. Но её изображение – рваные клочки отдельных усиленных лучей яркости, проходящих через эту массу.

Измеряя положение этих изображений далёкой галактики, можно оценить массу гравитационной линзы. Оказывается, что это хороший **метод измерения суммарной массы скоплений галактик**. Он доказывает, что в состав скоплений галактик входит большое количество тёмного вещества.

Но также это является хорошим **методом измерения расстояний**, потому что лучи света, идущие от далёкого яркого источника и проходящие через скопление галактик, играющее роль гравитационной линзы, идут разными путями (рис. 12.28).

Если в далёкой галактике происходит, например, вспышка сверхновой, один луч принесёт эту информацию нам раньше, а другой позже. Это является **методом прогнозирования вспышек сверхновых звёзд**. Если мы увидели одну вспышку, через

несколько месяцев можно ожидать свет от неё, пришедший другим путём. Это помогает вычислить длину путей, то есть расстояние до далёкой галактики.

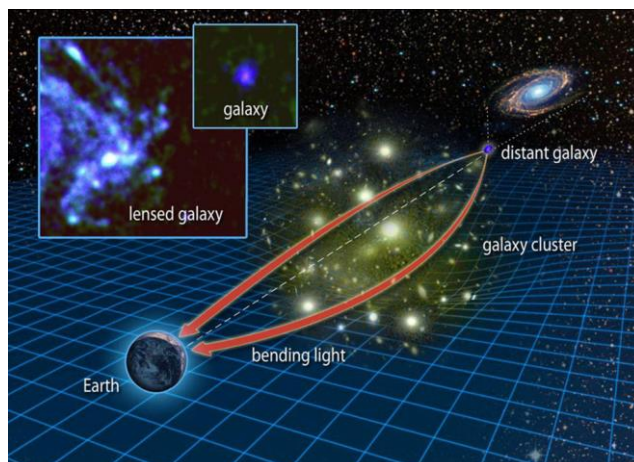


Рис. 12.28. Пути лучей от далёкого объекта до Земли

В скоплениях происходит движение звёзд и звёздных систем. Мы измеряем это, пользуясь эффектом Доплера – смещением линий в спектре в зависимости от того, к нам или от нас движется галактика (рис. 12.29а).

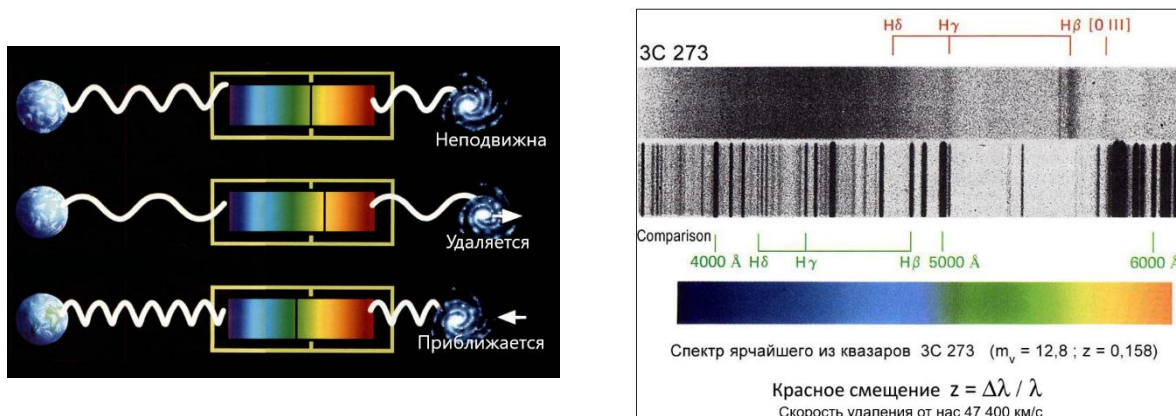


Рис. 12.29. а) эффект Доплера в спектре Галактики, б) длины волн линий в бальмеровской серии водорода в лабораторном спектре и спектре далёкой галактики

Надо отметить, что была эпоха, когда астрономы сомневались, а доплеровский ли это эффект. Мы получаем только наблюдаемое смещение линий, значит, **изменение длины волны квантов**, которые излучились известным нам атомом. Например, на рис. 12.29б показано, что в лабораторном спектре и в спектре далёкой галактики линии бальмеровской серии водорода имеют разную длину волны. То есть прилетевшие от галактики кванты имеют другую энергию – они потеряли часть энергии по пути.

Сегодня уже не осталось сомнений, что эффект Доплера. Галактики приближаются к нам или удаляются от нас, поэтому изменяется длина волны. Но в начале 20 в. были разные предположения, в том числе **теория старения квантов**, согласно которой они год от года теряли энергию, взаимодействуя с межгалактической

плазмой или даже с виртуальными частицами, то есть практически с вакуумом. Но сегодня эта теория признана ошибочной.

Первым человеком, который измерил движение галактик, был В. Слайфер. Он измерил фактически **скорости галактик** (рис. 12.30) и предположил, что раз быстрее удаляются менее яркие, они скорее всего, расположены дальше от нас.

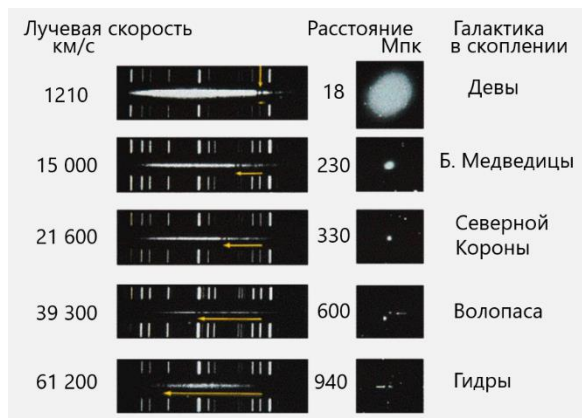


Рис. 12.30. Спектры галактик на разном расстоянии от Земли

Но точные знания о **расстоянии до галактик** появились в работах Э. Хаббла (рис. 12.31а). Он использовал факт, что **колебания яркости цефеиды** позволяют измерить период её колебаний, а знания периода можно перевести в светимость этой звезды (рис. 12.31б). Сравнивая светимость с видимой звёздной величиной, можно вычислить расстояние.

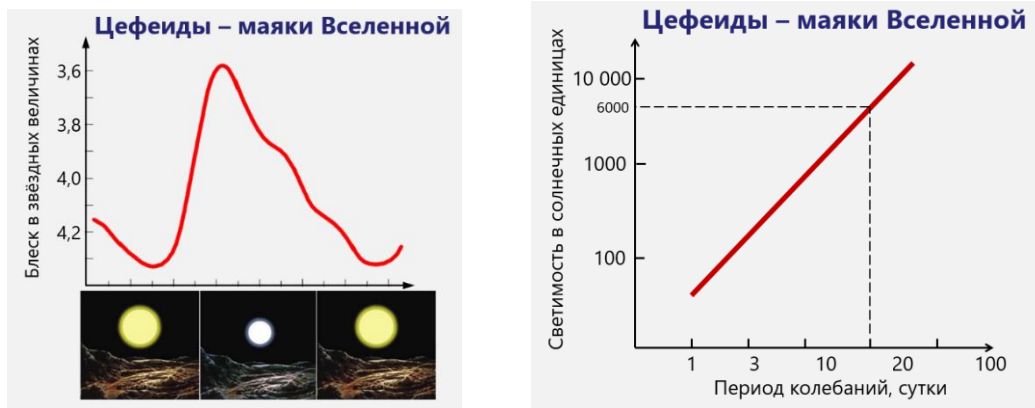


Рис. 12.31. а) Э. Хаббл, б) изменение блеска цефеиды

Эту зависимость в начале 20 в. выяснила Х. Ливитт, наблюдая Большое и Малое Магелланово Облако. На сегодняшний день **зависимость светимости от периода колебаний цефеид** известна очень хорошо (рис. 12.31б).

Хаббл определил **расстояния до ближайших галактик** и впервые нарисовал картинку, на которой отметил **скорости галактик** и расстояния от нас до этих галактик. Хаббл систематически ошибался в определении расстояний примерно в десять раз, но относительные расстояния измерил правильно.

Он провёл линейную зависимость между скоростью удаления галактик и расстоянием до них, которую называют **законом Хаббла** (рис. 12.32а). Константа, которая связывает расстояние и скорость, называется **постоянной Хаббла**. Но в разные периоды жизни Вселенной она будет разная. Её современное значение обозначают  $H_0$ . С удалением на каждый Мпк скорость удаления далёких галактик возрастает примерно на 70 км/с.

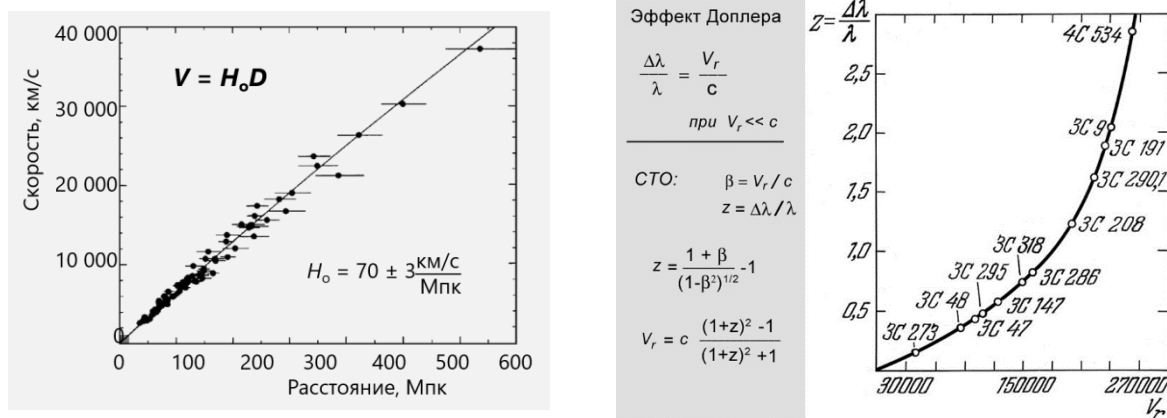


Рис. 12.32. а) закон Хаббла «скорость – расстояние», б) зависимость скорости от красного смещения

При высоких скоростях удаления надо учитывать закономерности, известные из **специальной теории относительности** (рис. 12.32б). Скоростей больше скорости света не бывает, поэтому красное смещение спектральных линий может быть любым, а линейная скорость упирается в скорость света. Поэтому **зависимость скорости от красного смещения** выражается простой формулой  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{c}$  только при небольших относительно скорости света скоростях движения галактик.

Отметим, что сама **зависимость Хаббла не является методом измерения расстояний**. Мы можем сказать, что совокупность наблюдаемых галактик расширяется симметрично, однородно, изотропно. В этом смысле закон Хаббла говорит, что расстояние связано со скоростью формулой  $V = H_0 D$  независимо от того, в каком направлении неба мы наблюдаем галактику.

Но сама эта закономерность получена в результате измерения скорости отдельно по спектрам и расстояния отдельно по каким-то индикаторам. Она лишь выведена на основе этих измерений. Прикинуть расстояние законом Хаббла можно, но использовать как метод нельзя.

Один из самых дальнобойных методов измерения расстояний – **метод прокола световым лучом** (рис. 12.33а). Когда мы обнаруживаем далёкий яркий источник (ядро активной галактики, квазар), луч его света, идущий до нас, может пронизывать какое-то количество встреченных по пути галактик. И каждая из них оставит свой след в спектре, одну и ту же линию поглощения одного и того же элемента, но в разных частях



пришедшего спектра, потому что все эти галактики удаляются от нас с разными скоростями.

Самый далёкий объект удаляется быстрее всех, но он светит, поэтому у него **линия излучения**, например, какая-то линия водорода. А дальше эта **линия в поглощении видна на разных красных смещениях**. Таким образом можно довольно точно определить структуру мира в данном направлении.

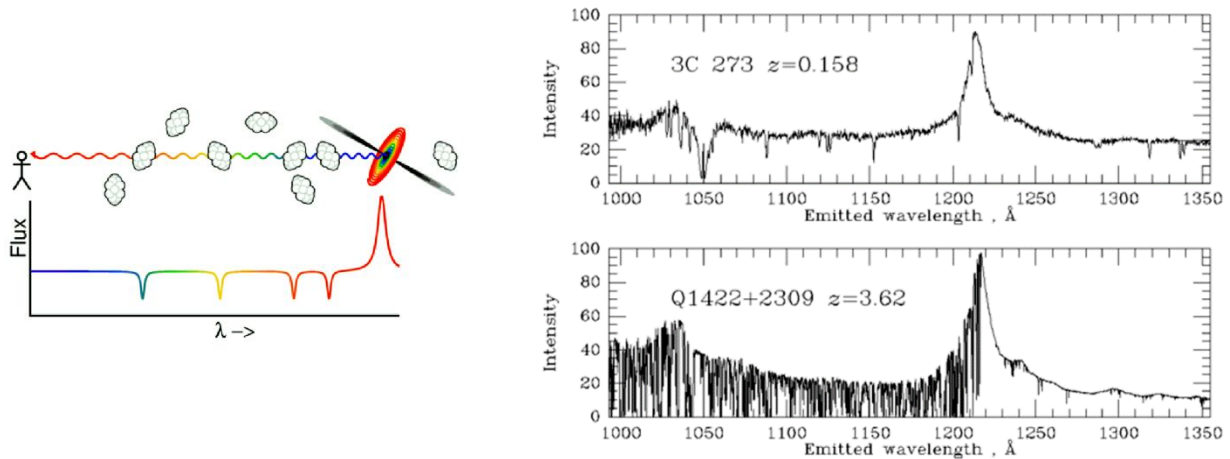


Рис. 12.33. а) метод прокола световым лучом, б) линии  $Ly-\alpha$  (121,6 нм) в спектрах ближайшего и далёкого квазаров

На рис. 12.33б представлены два спектра реальных наблюдаемых объектов. На верхней картинке **ближайший квазар**, его линия излучения ультрафиолетовая  $Ly-\alpha$ . Видно, что на пути излучения встретила одна мощная галактика и несколько небольших.

А на нижней картинке один из самых **далёких квазаров**, его  $Ly-\alpha$  в лабораторной системе отсчёта. Слева от яркой линии целый «лес» **линий поглощения**, то есть луч этого квазара пронизывает огромное количество встреченных им по пути галактик, и каждая из них оставляет свой след в спектре.

На диаграммах, изображающих структуру мира, всегда рисуется **сектор неба**, который послужил для этого обзора (рис. 12.34а). В основании этого сектора находится наблюдатель, и в некой части неба измерено во всех направлениях расстояние до всех встречных галактик.

Даже на больших расстояниях в миллионы световых лет (100–150 Мпк) мы видим довольно крупные структуры: **скопления и сверхскопления галактик** и даже такую гигантскую структуру, которую назвали **Большой стеной галактики**.

На рис. 12.34б к этому обзору пристыкованы следующие, дальше была найдена **Великая стена** следующего обзора. Можно сказать, что Вселенная не такая уж однородная, и на любых масштабах, которые сегодня можно окинуть взглядом телескопа, мы встречаем какую-то структуру.

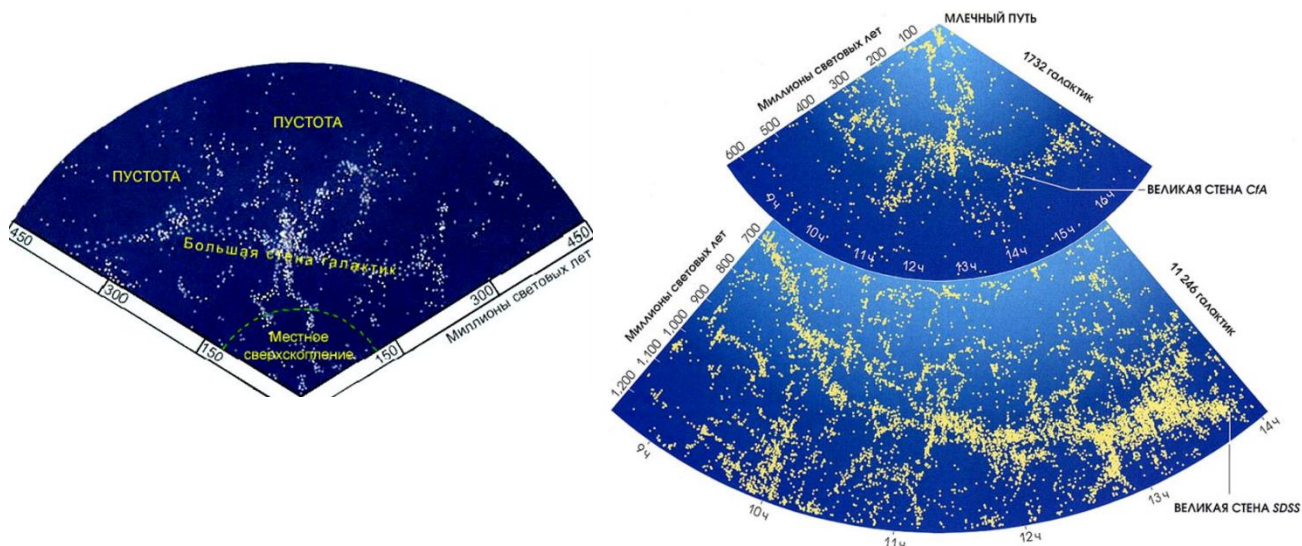


Рис. 12.34. а) обзор красных смещений галактик на секторе неба, 1985 г., б) сравнение обзора Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и Слоановского цифрового обзора неба

На карте на рис. 12.35 видны структуры к северу и к югу от плоскости Млечного Пути. Сам Млечный Путь закрывает большую часть неба, и там почти невозможно проводить наблюдения.

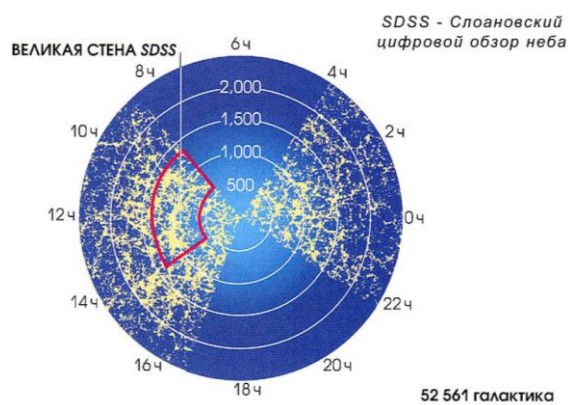


Рис. 12.35. Структуры на карте SDSS к северу и к югу от Млечного Пути

## Лекция 13. Космология

### Структура Вселенной

**Космология** – это изучение Вселенной в самых больших масштабах её пространства и времени. Вселенная – это весь материальный мир, и мы никогда не достигнем его границ и не поймём полностью его устройство, потому что наши возможности ограничены. У нас есть телескопы, и то, что мы видим, и называется нашей **астрономической Вселенной**. У неё те границы, от которых к нам приходит какая-то информация.

На сегодняшний день **оптические телескопы** позволяют увидеть объекты на расстоянии 13,7 млрд лет, потому что Вселенной всего 13,7 млрд лет, и от более далёких областей свет до нас ещё не дошёл.

**Радиотелескопы** и **инфракрасные телескопы** смотрят немного дальше. Вселенная расширяется, излучение от далёких областей приходит с большим красным смещением, поэтому нужны наблюдения именно в инфракрасном диапазоне. А у излучения от ещё более далёких областей такое большое красное смещение, что необходим радиодиапазон.

Ещё более далёкие области существуют, но от них мы пока не можем ничего получить. Они находятся на границе той астрономической Вселенной, которую мы когда-нибудь сможем достичь. С немного больших расстояний, чем позволяет радиодиапазон, приходят **космологические нейтрино**, но учёные пока не умеют их ловить. От ещё более далёких областей приходят **гравитационные волны**, но их поймать ещё труднее, потому что они очень слабые и длинноволновые.

Теории о том, что находится дальше, существуют, но проверить их наблюдениями будет очень сложно.

На прошлой лекции была рассмотрена **лестница методов измерения расстояний** (рис. 13.1). Астрономы опираются на самые надёжные **тригонометрические методы**, с их помощью были достигнуты довольно большие расстояния порядка 5–10 кпк. Но вряд ли с помощью них можно уйти дальше. Уже у GAIA возникают проблемы с тригонометрическим методом измерения расстояний, потому что свет, идущий от далёких объектов, немного искривляется по пути, проходя мимо массивных тел типа звёзд, чёрных дыр и т. д. Геометрия становится уже не такой простой, сложно узнать, где именно траектория света искривилась. Поэтому данный метод хорошо работает в пределах Галактики, а на межгалактических расстояниях уже нет.

Дальше каждый следующий метод опирается на предыдущие и вносит свои ошибки. Чем дальше мы уходим, тем больше ошибки измерения расстояний. Но всё-таки эти методы работают.

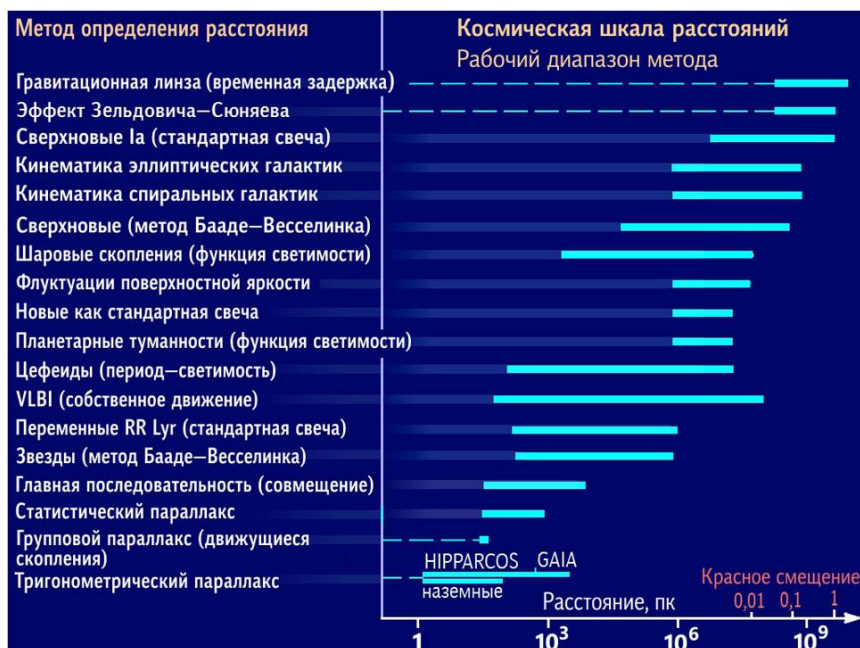


Рис. 13.1. Космическая шкала расстояний

А вот измерять расстояния по скорости расширения Вселенной, **по красному смещению линий** в спектре нельзя, это не метод. Астрономы обнаружили расширение Вселенной и нашли некоторые его закономерности с помощью методов измерения расстояний. **Закон Хаббла** может давать ошибочные выводы, потому что быстро улетающее тело может быть и довольно близко, просто что-то придало ему большую скорость.

Ещё мы знаем, что **Вселенная неоднородна**. В малых масштабах существует очень большая неоднородность. Скопления галактик уже более-менее однородны, но между ними большие пространства (рис. 13.2а). Если рассматривать сверхскопления галактик, **однородность становится ещё больше**.

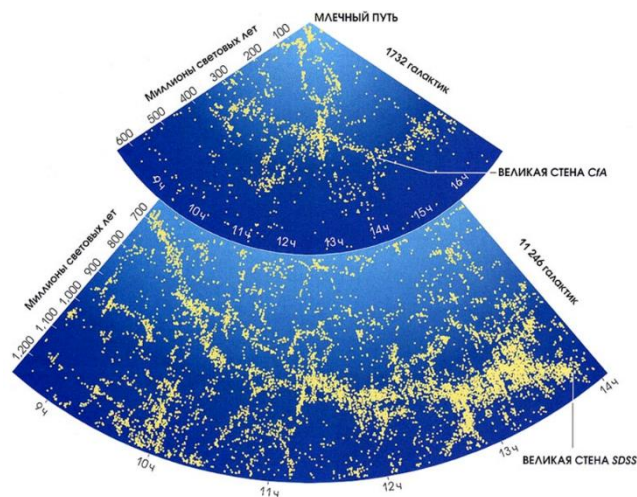


Рис. 13.2. а) Вселенная на разных масштабах, б) обзоры неба: Гарвард-Смитсоновский и Слоановский

Структура сохраняется, но чем **больший кусок** пространства мы рассматриваем, тем меньшее различие средней плотности вещества между соседними кусками. На уровне сверхскоплений различия составляют разы, а в меньших масштабах между звёздами и межзвёздным пространством – миллионы и миллиарды раз.

На ещё больших масштабах, которые показывает **программа обзора неба**, видно, что полной однородности нет (рис. 13.2б, верхний обзор). Между скоплениями и сверхскоплениями есть довольно большие пустоты - **войды**, правда, более детальные наблюдения показали, что там тоже находятся не очень яркие небольшие галактики. На большем масштабе войды сохраняются, но появляются более крупные структуры, **однородность становится ещё заметнее** (рис. 13.2б, нижний обзор).

Таким образом, **космология должна объяснить** и то, почему Вселенная на больших масштабах однородна, и то, почему на более мелких есть структура. Это не просто, потому что сегодня, куда бы мы не посмотрели, видим объекты на расстоянии 13 млрд световых лет. Значит, от объектов в противоположных направлениях неба свет приходит к нам практически за время жизни Вселенной. А от одного из этих объектов до другого свет за данное время дойти не мог. Тогда непонятно, **как Вселенная стала однородной**, если у неё не было времени обменяться информацией между далёкими областями, и откуда они знают, как выровнялись физические условия, если никогда не были в контакте.

Надо отметить, что «расширение Вселенной» – не очень правильный термин. Астрономы наблюдают галактики и их скопления и измеряют их движение, поэтому вернее говорить **расширение системы галактик**.

Рассмотрим, как связаны между собой движение галактик и их положение в пространстве. Первым человеком, научившимся измерять **скорости движения галактик**, был В. Слайфер. Он получал спектры галактик и замечал в них смещение линий. Теперь известно, что это происходит из-за эффекта Доплера, ведь галактики улетают от нас.

Но доказать это было не так просто. Например, Хаббл измерил расстояние до галактик, Слайфер измерил смещение спектральных линий, и тогда Хаббл, уверенный, что смещение линий объясняется эффектом Доплера, построил линейную зависимость, отображённую на рис. 13.3а, – **скорость пропорциональна расстоянию до галактики**.

Однако астрофизики довольно долго и сложно убеждались в том, что здесь имеет место именно эффект Доплера. Мы видим только смещение линий. На рис. 13.3б видно, что лабораторная бальмеровская серия линий водорода и та же серия в спектре квазара из далёкой галактики смещены, то есть **кванты**, излучённые водородом в этой галактике, **пришли к нам с другой энергией**.

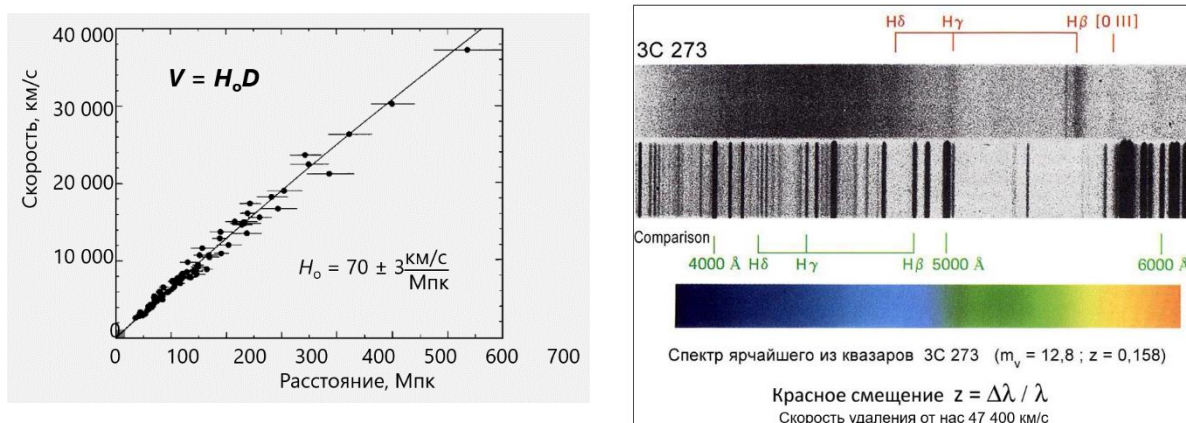


Рис. 13.3. а) закон Хаббла «скорость – расстояние», б) смещение бальмеровской серии линий в лабораторном спектре и в спектре ближайшего квазара 3C 273

Объяснения этому давались разные. Очевидно, что эффект Доплера (рис. 13.4) должен был бы привести к этому, но также это могли сделать и другие эффекты.

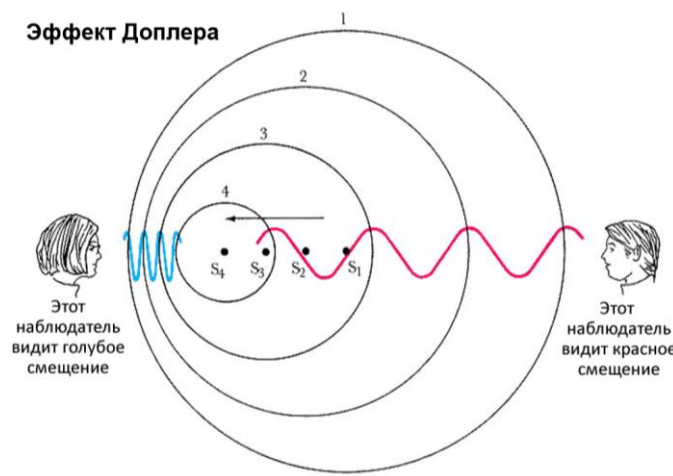


Рис. 13.4. Эффект Доплера

Ф. Цвики предложил гипотезу старения фотонов. Кванты долго летят через вакуум, а он не является пустотой, в нём постоянно рождаются и гибнут виртуальные пары частиц и античастиц, происходят флуктуации. И на этих флуктуациях квант должен рассеиваться и терять энергию.

На самом деле Цвики считал, что в плазме есть некоторое количество лептонов, и, рассеиваясь на них, фотоны долетают к нам более красными. Но при таком рассеянии они бы ещё меняли направление, и изображение приходило бы расплывчатым. А на самом деле далёкие галактики такие же резкие, как и близкие.

Тогда эту тему закрыли, но уже через несколько лет квантовая механика сказала, что при рассеянии на виртуальных частицах фотоны не будут менять направление момента, только энергию. И М. Бронштейн доказал, исходя из квантовой механики, что этого эффекта быть не должно. С тех пор учёные уверены, что здесь причина всё-таки в эффекте Доплера, и зависимость на рис. 13.4б можно строить, откладывая по осям

наблюдаемую скорость и наблюдаемое расстояние, где скорость измерена по смещению спектральных линий.

Эту теорию проверяли: например, если эффект Доплера меняет частоту электромагнитной волны, то он должен менять частоту любого другого периодического процесса. К таким процессам относятся колебания звёзд, цефеиды, мы их наблюдаем в далёких галактиках и видим, что их периоды растягиваются.

Зависимость  $V = H_0 D$  говорит о том, что **мир расширяется однородно**. Когда мы сидим в галактике на шаре, то наблюдаем, что каждая галактика удаляется при расширении совокупности галактик пропорционально расстоянию (рис. 13.5). Но если бы мы сидели не в своей галактике, а в соседней или в любой далёкой, увидели бы то же самое.

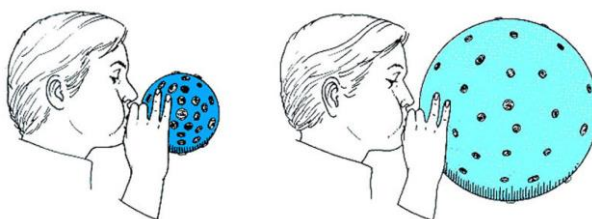


Рис. 13.5. Расширение системы галактик

Скорость и расстояние связывает **константа Хаббла**, индекс ноль говорит о том, что такую связь мы наблюдаем сегодня. Существует взаимодействие между галактиками, они разлетаются, но притягивают друг друга, тормозят свой полёт, значит, константа Хаббла меняется.

Также **Вселенная изотропна** – одинакова во всех направлениях:

$$V = kD, \quad k = H_0$$

### Изучение начальных этапов расширения Вселенной

Сегодня совокупность галактик расширяется, они разлетаются. Можно обернуть стрелу времени в прошлое, где они были ближе друг к другу. Значит, тогда средняя плотность вещества в нашем мире была больше, ведь по **закону Ломоносова-Лавуазье сохранения материи**, сколько есть вещества, столько и было всегда.

Экстраполируя это всё дальше и дальше в прошлое, можно сказать, что был момент, когда всё вещество было сжато в невероятно плотное состояние. Тогда и было **начало расширения нашего мира** (рис. 13.6).

Но физики начала двадцатого века в этом усомнились. А. Эйнштейн решил, что мир надо стабилизировать. Оказалось, что в системе уравнений общей теории относительности можно ввести один член, который не испортит геометрию мира, но эффективно создаст **антигравитационное влияние между объектами**. Гравитация будет уравновешена антигравитацией, и мир будет стационарным, Вселенная всегда будет такой, как сегодня.

Когда оказалось, что **мир галактик расширяется**, Эйнштейн убрал данный член из теории относительности. Однако сегодня мы знаем, что он там всё-таки должен быть.

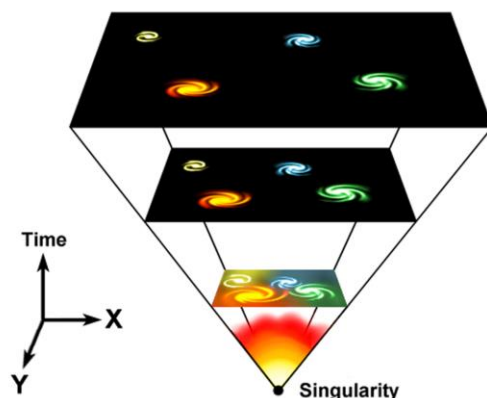


Рис. 13.6. Расширение Вселенной

Мир расширяется, но не очень хотелось верить, что это когда-то началось, и в скором времени он так расширится, что ничего не останется. Астрофизик Ф. Хойл предположил, что на месте разлетевшихся галактик возникают новые. Но вещество не может взяться ниоткуда. Однако если есть поле, то есть **энергия** каких-то **колебаний**, она **может превращаться в материю**:  $E = mc^2$ . Значит, на месте пустоты возникают протоны и электроны, из них складываются звёзды и галактики.

Рассмотрим разницу между **статичной Вселенной Эйнштейна** и **стационарной Вселенной Хойла**. Статичность – это когда всё неподвижно, а стационарность – когда процесс происходит, но его основные параметры не меняются. Например, если из крана течёт струя воды, она будет течь и через час. Статичности нет, а стационарность есть.

Хойл в насмешку над теорией расширения Вселенной, назвал её начало **Большим Взрывом (Big Bang)**. Однако многие другие факты позже показали, что у Вселенной было плотное горячее начало 13–14 млрд лет назад. Теория стационарной Вселенной оказалась неверной, но термин прижился.

Что нам говорит о том, что Вселенная не может быть вечной и одинаковой? Уже в 16–17 вв. Т. Диггес, И. Кеплер, О. Герике и Э. Галлей догадывались о том, что в 19 в. было сформулировано как **парадокс Ольберса**. Если Вселенная одинакова везде и вечна, то она равномерна наполнена звёздами и галактиками, и куда бы мы ни посмотрели, наш взгляд обязательно должен найти поверхность какой-то звезды. Значит, вся Вселенная должна быть такая же яркая, как фотосфера Солнца. Но это не так, по ночам темно.

Значит, что-то в этом парадоксе надо было объяснить. Говорили, что во Вселенной много пыли, и мы издали просто не видим звёзды. Но физики быстро доказали, что звёзды своим однородным излучением нагреют пыль до температуры, при которой светится их поверхность, и **пыль будет светиться** не хуже поверхности.



Таким образом, **тёмное ночное небо** говорит нам либо о том, что у Вселенной есть границы, до которых всё однородно, но за ними никаких звёзд нет. В это сложно поверить. Либо Вселенная имеет ограниченный возраст.

В каком смысле нужно понимать «Большой Взрыв»? Первыми приходят мысли, что где-то в центре был взрыв, и его осколки разлетаются в пустоту во все стороны. Но это неверная аналогия. Космологи говорят, что начало действительно было, как и точка, из которой разлетается то, что мы сегодня наблюдаем. Если дойти до планковских плотностей, выше которых физика уже не может представить, весь **мир**, обозреваемый сегодня телескопами, **был меньше макового зерна**.

Но это не значит, что вокруг была пустота. Этих **зёрнышек было много**, и они были прижаты друг к другу своими поверхностями. Сегодня мир довольно однороден, колебания средней плотности невелики, но если пустить картину назад, то однородность в прошлом только нарастает. Точнее, **неоднородность нарастает со временем**: мир разделяется, гравитация сжимает отдельные куски вещества.

Пока является доказанным фактом, что Вселенная однородна и изотропна. **Изотропию** можно было бы объяснять тем, что мы находимся в центре мира, и он расширяется так, что куда ни посмотришь, всё одинаково. Но мы находимся в рядовой галактике в рядовой области Вселенной, которая вряд ли располагается в центре мира, поэтому такое объяснение не работает. Поэтому начало было, сингулярность как какая-то особенность была, но только в том смысле, что это было начало процесса расширения. **Был момент времени**, когда началось расширение, **но не было особой точки** в пространстве, из которой оно началось. Пока мы считаем, что всё пространство, которое даже теоретически возможно объять телескопом, было одинаковым.

При сжатии газ нагревается, а при расширении охлаждается. Кажется, что в прошлом Вселенная должна быть очень горячей, но не факт, что так было на самом деле. **Начало расширения могло быть горячим**, как мы себе это представляем, с высокой энтропией в газе и случайными хаотическими движениями частиц (рис. 13.7а).



Рис. 13.7. а) горячий взрыв, б) холодный «взрыв»

Но также **взрыв мог быть и не горячим**. Если кто-то бросает камни во все стороны, они разлетаются не потому, что их расшвыривает давление горячего газа, а потому что кто-то внешний задаёт им направление и скорость полёта (рис. 13.7б).

Требовалась проверка этих гипотез. Если Вселенная была в прошлом не только плотная, но и горячая, значит, в прошлом энергия частиц была всё более и более большой (рис. 13.8), а при температурах в миллионы и уж точно миллиарды кельвинов должны были происходить **термоядерные реакции**.

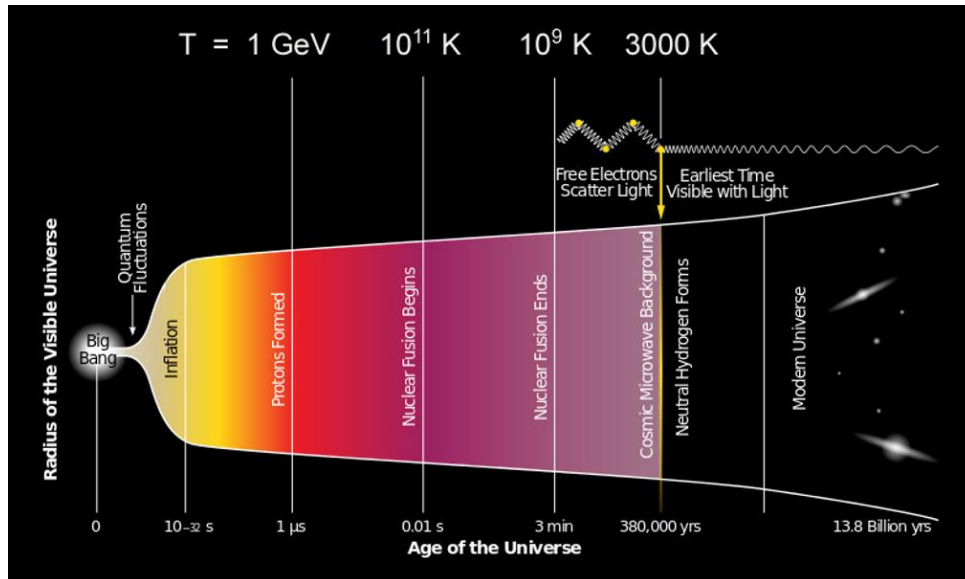


Рис. 13.8. Температура Вселенной по мере её расширения

Пусть в первые мгновения расширения Вселенной действительно происходили термоядерные реакции, значит, она была такой же плотной и горячей, как ядра звёзд. Тогда в ней происходили похожие термоядерные реакции, но не совсем идентичные. Это же были первые мгновения расширения, значит, до этого она была ещё более горячей, а 1 GeV – уже энергия покоя элементарных частиц, то есть **при таких энергиях должны были родиться сами элементарные частицы**: протоны, нейтроны, а потом электроны.

У протонов и нейтронов масса почти одинаковая, значит, они должны были присутствовать в горячей исходной среде в равном количестве. Тогда процесс термоядерного синтеза упрощается. В звёздах из протонов сначала должны появиться нейтроны, а это управляется слабыми ядерными взаимодействиями и происходит очень медленно. А тогда этот этап был не нужен, протоны и нейтроны просто сливались, и получался дейтерий, из него лёгкий изотоп гелия, а уже из него нормальный гелий (рис. 13.9а).

Всё это шло очень быстро, и за первые пять минут термоядерные реакции должны были пройти весь процесс, который в Солнце длится миллиарды лет. **Вселенная расширялась и вещество охлаждалось**, и дальше термоядерный синтез должен был прекратиться.

На рис. 13.9б показано, как менялся химический состав за первые пять минут расширения горячей плотной Вселенной. Здесь не показано количество протонов (ядер водорода), их всегда много, они не успевают все участвовать в реакциях.

Определённое количество вещества после прекращения реакций должно было сохраняться миллиарды лет до нашей эпохи. Термоядерный синтез в звёздах лишь немного добавляет тяжёлых элементов.

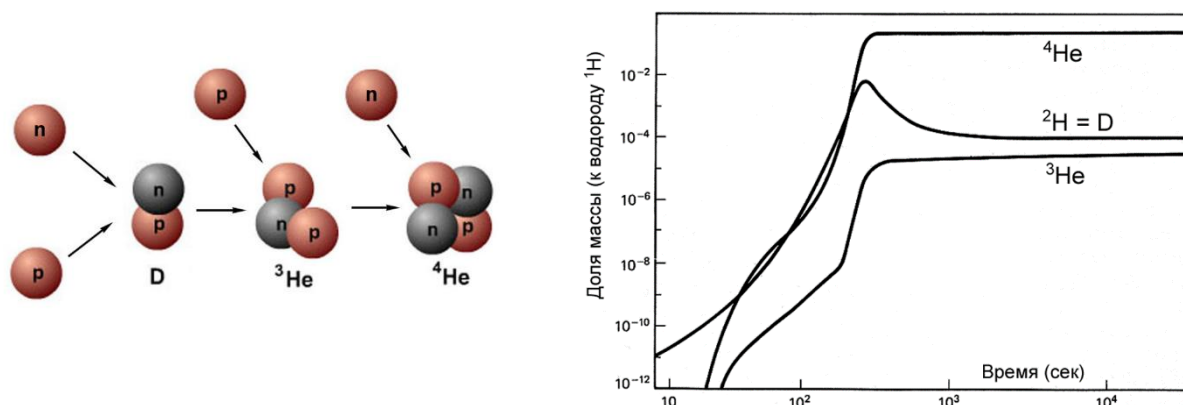


Рис. 13.9. а) рождение вещества в первые 5 минут, б) изменение химического состава Вселенной за первые 5 минут её существования

На самом деле астрономы находят места, где первозданный **химический состав Вселенной сохранился до наших дней**. Например, в атмосфере Юпитера гелия примерно четверть от содержания водорода. Все звёзды состоят на три четверти по массе из водорода и на четверть из гелия.

**Дейтерия** мало, но это очень важный показатель. На звёздах дейтерий мог вступать в термоядерные реакции и сгорать там или, наоборот, появляться. А в холодных планетах-гигантах он сохраняется вечно. В атмосфере Земли изотопный состав водорода измерять нельзя, потому что из неё водород довольно легко улетает, а дейтерий вдвое тяжелее и покидает её не так активно, здесь баланс между ними меняется. А на Юпитере вторая космическая скорость 60 км/с, а атмосфера холодная, поэтому эта планета держит свой газ.

Также в первые пять минут расширения Вселенной нарабаталось немного **лития**, но именно его сейчас используют. Других источников лития в природе не было. В звёздах он только сгорает.

Этот расчёт – очень надёжное доказательство того, что мы правильно представляем начало расширения Вселенной. Люди делали расчёты при разных предположениях о плотности и температуре вещества. Оказалось, что при разных плотностях должно было нарабататься разное количество дейтерия (рис. 13.10). Мы измеряем его количество в атмосфере Юпитера и понимаем, **в каких пределах была средняя плотность Вселенной**. Гелий-3 менее надёжный индикатор, но тоже хороший.

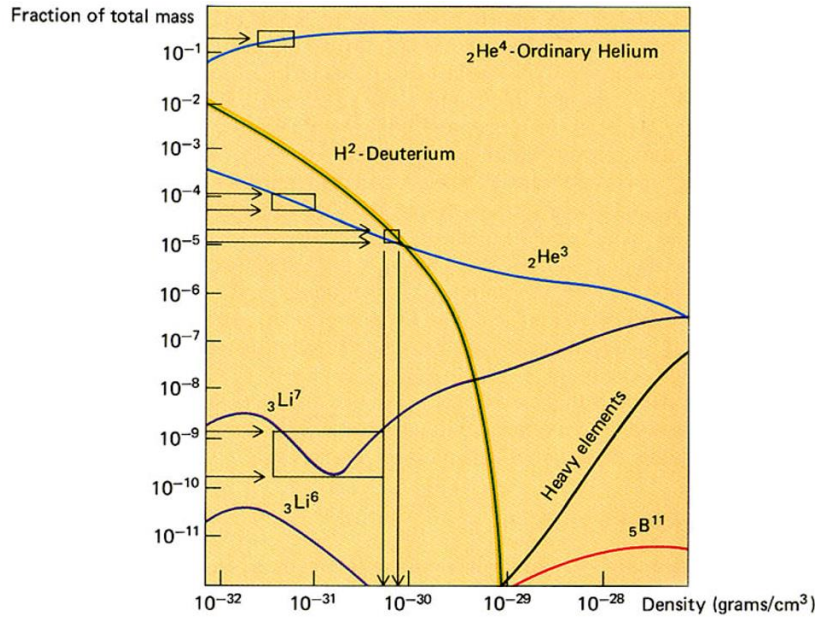


Рис. 13.10. Определение средней плотности Вселенной в первые моменты по количеству дейтерия и гелия 3

Раз Вселенная была горячей, значит, она была наполнена излучением. Оно должно было сохраниться до нашей эпохи и заполнять всю Вселенную. Первым нашёл его учёный, у которого из-за него шумел микроволновый приёмник. Потом А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков написали, что надо искать приходящее из космоса излучение с температурой около 3 К, и наилучший прибор для такого поиска – радиантенна.

А. Пензиас и Р. Вилсон работали на радиолокаторе (рис. 13.11а). Он представлял из себя часть параболоида, сигнал, собранный отражателем, шёл сквозь узкий волновод. Радиосум даже после прочистки прибора сохранялся, и это было **тепловое равновесное чернотельное планковское излучение**, заполняющее всё пространство.

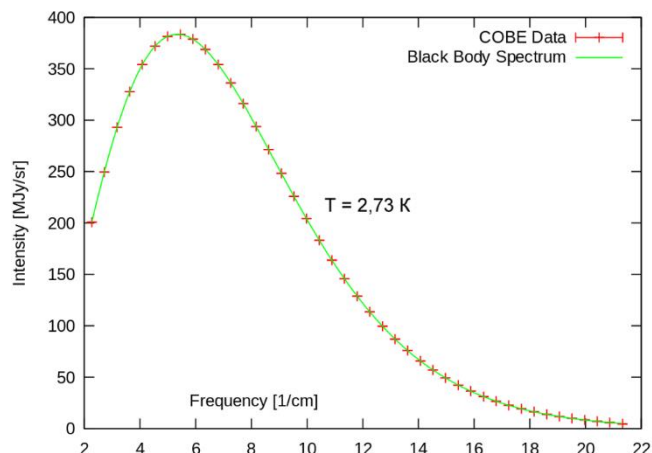
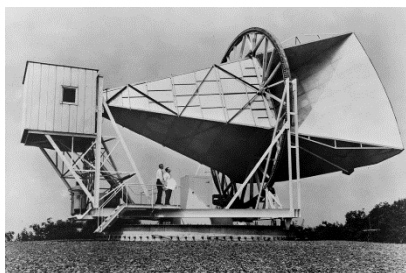


Рис. 13.11. а) рупорная антенна, с которой было открыто реликтовое излучение, б) интенсивность реликтового излучения на разных частотах и его температура

Оно вроде бы **холодное** – пространство нагрето до 2,7 К (рис. 13.11б). Но здесь не звёзды пускают в пустоту отдельные кванты, которые там теряются, а пусть и холодное излучение, но заполняющее полностью всё пространство (термостат), и у него энергии намного больше, чем у всех звёзд всех галактик. Это источник (реликт) древнего горячего состояния Вселенной.

Американцы его до сих пор называют **фоновым микроволновым излучением**. В принципе, это правильное определение: оно фоновое и его максимум на сантиметровых и миллиметровых волнах. Также его называют **реликтовым излучением**.

Телескоп – своеобразная машина времени: чем дальше он видит, тем в более далёкие эпохи заглядывает. Излучение всегда приходит с какой-то поверхности. Где-то в далёком прошлом была **поверхность, нагретая до высокой температуры**, оттуда полетели кванты (рис. 13.12). Но, поскольку поверхность от нас удаляется, как и мы от неё, работает **эффект Доплера**, и мы воспринимаем их как низкоэнергичные радиокванты, а на самом деле в далёком прошлом они были высокоэнергичными.

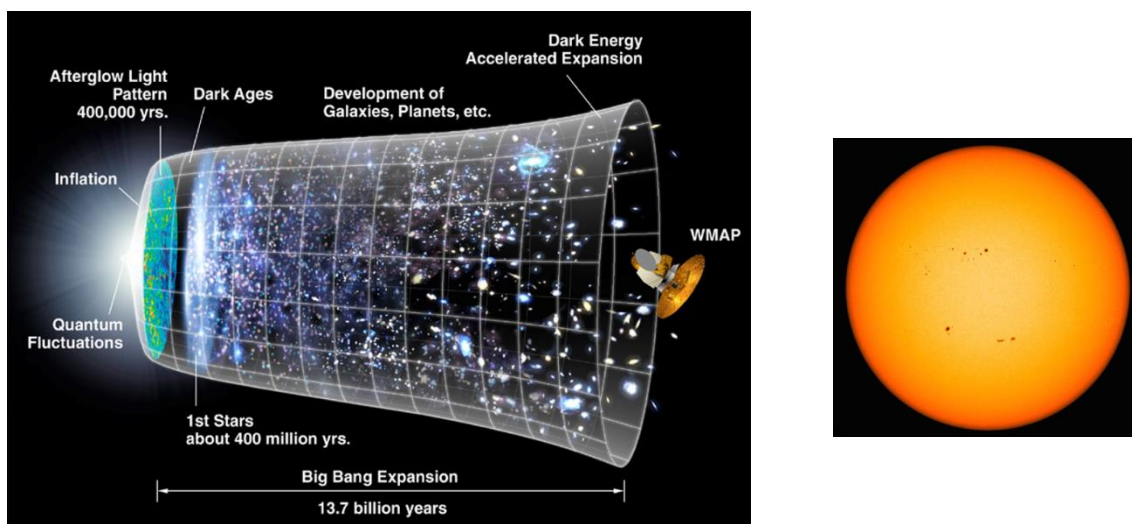


Рис. 13.12. а) поверхность, с которой в прошлом полетели кванты, б) поверхность последнего рассеяния Солнца (б)

Данная поверхность – **поверхность последнего рассеяния**. Когда мы смотрим на облака, видим ту поверхность облака, начиная с которой свет беспрепятственно до нас доходил. Внутри облака свет много раз преломлялся и отражался на капельках воды.

Аналогично, когда мы смотрим на звезду, например, на Солнце, мы видим его поверхность (рис. 13.12б). Внутри этой поверхности плотное вещество, снаружи хромосфера и солнечная корона, а видим мы поверхность последнего рассеяния световых квантов. Они оттуда летят к Земле и по пути испытывают взаимодействие с чем-то с очень малой вероятностью. Поэтому они до нас долетают, и мы видим нерассеянную картинку деталей на поверхности Солнца.

А от какой поверхности идёт реликтовое излучение? Это поверхность, с которой в прошлом, когда Вселенная была заполнена горячим веществом, оптические кванты полетели к нам как радиокванты. А потом Вселенная продолжала жить, и сложилась та структура, которую мы сегодня наблюдаем (рис. 13.13а).

Теперь надо понять, как сложилась жизнь вещества от того далёкого момента до сегодняшнего дня, чтобы в процессе этой жизни образовалась такая структура. На рис. 13.13а показано, как выглядит **структура мира в больших масштабах**. Это часть большой математической **3D-модели**. Видны плотные скопления галактик, отдельные галактики и т. д.



Рис. 13.13. а) модель структуры мира в больших масштабах, б) пчелиные соты, в) резиновая губка

Эту структуру мира надо как-то описать. Очень часто её называют сотовой структурой мира галактик. Однако пчелиные **соты** очень одинаковые по форме и размеру (рис. 13.13б), а мир построен не настолько геометрически идеально. Значит, надо придумать другую бытовую аналогию, которая предложила бы более точный геометрический портрет большой Вселенной.

Например, менее регулярную структуру имеет **пористая губка** (рис. 13.13в). В ней есть пустоты и более плотные места. Однако есть такое понятие как **перколяция** – возможность попасть из одного объёма в другой. В губке она очень низкая, потому что внутри объёма можно двигаться, а преодолеть стенки трудно.

Ещё менее регулярная структура – **джунгли** (рис. 13.14а). Здесь перколяция высокая, птицы могут свободно летать, огибая плотные участки структуры.

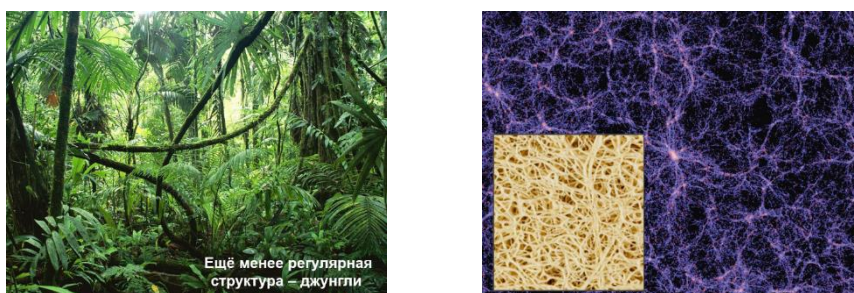


Рис. 13.14. а) джунгли, б) сравнение структуры Вселенной и структуры мочалки из люфа

Ещё есть **мочалка из тыквы люфа**. На рис. 13.14б её структура сравнивается со структурой Вселенной. Видно, насколько они похожи.

Надо объяснить, как из однородного мира к нашей эпохе сложилась такая неоднородная структура. Можно построить **3D модель** на компьютере. В начальный момент в кубе вещество распределено почти однородно, и дальше по мере эволюции **неоднородность нарастает**. В модели учитывается расширение (падение средней плотности).

Можно посмотреть эволюцию модели **по этапам** (рис. 13.15). Туда, где вещество было немного более плотным, под действием гравитации стягивалось соседнее. В конце концов получилась довольно неоднородная и похожая на наблюдаемый мир Вселенную.

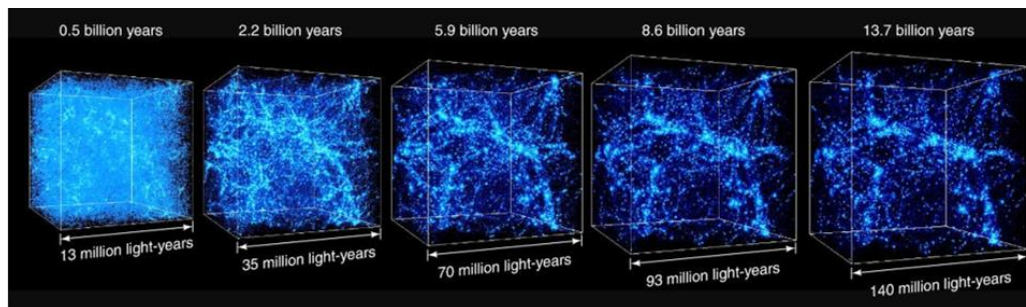


Рис. 13.15. Нарастание неоднородности по этапам

Но дальше оказалось, что тем модели, в которых было изначально очень однородное распределение вещества, требовалось огромное время, чтобы сложилась неоднородная структура. А у нашей Вселенной было всего 13–14 млрд лет. Значит, исходное состояние должно было быть достаточно неоднородным. Чтобы к нашей эпохе **перепад плотности был сто процентов**, в начале он **должен был составлять хотя бы один процент**.

Если всё изначально было неоднородным, значит, и **в реликтовом излучении должна была проявиться исходная неоднородность вещества**. Где плазма была плотнее, и излучение должно быть плотнее. На рис. 13.17а оранжевым представлена карта всего неба. Видно, что температура везде, кроме галактической плоскости, одинаковая, 2,73 К. Но сегодня Вселенная неоднородная, а в прошлом неоднородность было практически не заметить.

Пытаясь заметить неоднородность реликтового излучения, улучшали телескопы, делали новые приёмники, увеличивали точность. В конце концов неоднородность нашли, но немного не ту. Температура одинаковая по всему небу с точностью на уровне сотых долей К, а на уровне тысячных долей Кельвина неоднородность всё-таки возникла (рис. 13.17б). **В одном полушарии неба реликтовое излучение чуть теплее, в другом чуть холоднее**.

Но здесь причина уже понятна. Наш телескоп, Земля, Солнечная система и Галактика в целом куда-то летят относительно реликтового излучения. Излучение оттуда, куда мы летим, приходит с большей энергией квантов, а откуда мы удаляемся — с меньшей. Это обычный эффект Доплера, связанный с **движением наблюдателя относительно реликтового излучения**.

Теперь мы знаем, с какой скоростью летим и куда, но это не имеет отношения к самому реликтовому излучению. С Земли флуктуации плотности измерить не удалось. Стали запускать **спутники**, чтобы устранить помехи, создаваемые атмосферой (рис. 13.16).

Первым в 1984 г. полетел советский спутник «Прогноз-9» с системой RELIKT-1, и из его данных после нескольких лет работы получилось извлечь данные о неоднородности. Дальше в 1990 г. полетел американский спутник с радиоболометром COBE, и на нём уже точно заметили неоднородности. Дальше летали ещё более продвинутые спутники и уточняли детали. Эти телескопы замечали **колебания температуры от точки к точке на уровне сотых долей процента**.

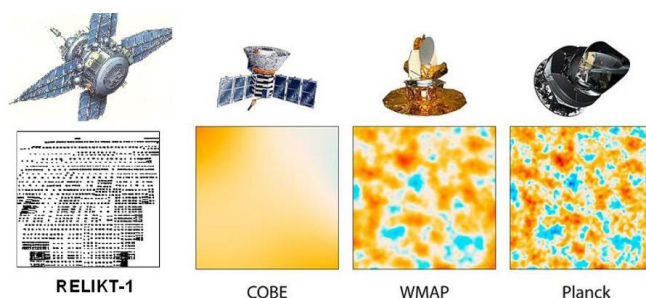


Рис. 13.16. Измерение неоднородностей со спутников

Таким образом, на уровне К и сотых долей К реликт однороден, на уровне тысячных долей К мы ощущаем своё движение относительно реликтового фона, и на уровне десятимиллионных долей К можно увидеть неоднородности плотности (рис. 13.17в).

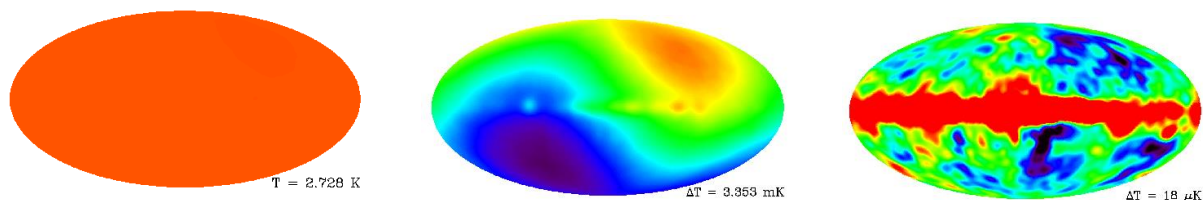


Рис. 13.17. Колебания температуры реликтового излучения на разных уровнях точности

Относительные флуктуации температуры получились  $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$ , значит, Вселенная в начальный момент действительно была неоднородной. Однако теоретики сказали, что таких **маленьких флуктуаций не хватает** для того, чтобы к сегодняшнему дню сложилась наблюдаемая структура галактик.

Посмотрим на ту эпоху, когда рождалось реликтовое излучение. Её возраст от начала жизни Вселенной примерно 400 тыс. лет. До неё **вещество было горячим и полностью ионизованным** (рис. 13.18а). Летали отдельно протоны и электроны, а между ними кванты света. Но кванты света не могли летать далеко, потому что рядом были заряженные частицы, на которых они рассеивались и потихоньку диффундировали.



Дальше наступила интересующая эпоха, температура плазмы упала примерно до 3000 К. При такой температуре **водород рекомбинирует**, то есть электроны садятся на протоны, и получаются нейтральные атомы водорода. А нейтральные атомы почти не взаимодействуют с электромагнитным излучением. У них есть отдельные переходы, когда электрон перемещается с орбиты на орбиту, но это происходит редко. А все кванты, которые не имеют энергии, точно равной энергии перехода электронов, свободно летят.

Значит, в этот момент **мир стал настолько прозрачным**, что кванты, которые тогда существовали в плазме, полетели, чтобы 13 млрд лет спустя долететь до нас в виде реликтового излучения.

Это важно, потому что те неоднородности температуры и плотности вещества, которые мы наблюдаем, не могли дорасти до неоднородностей нашей эпохи, а **ранее 400 тыс. лет у плазмы вообще не было шансов кучковаться**. Гравитация тогда не имела значения, потому что давление радиации создавало такую упругость в плазме, что никакого гравитационного сжатия (гравитационной неустойчивости) вещества быть не могло. Если кусок плазмы чуть-чуть сжимался за счёт гравитации, там возрастала плотность фотонов, и они его возвращали в исходное состояние.

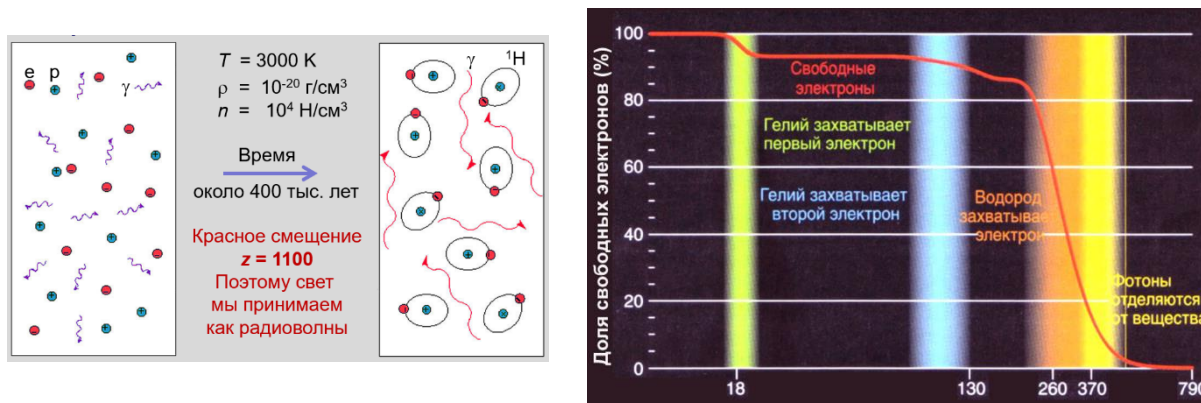


Рис. 13.18. а) мир до и после эпохи рекомбинации (400 тыс. лет от рождения Вселенной), б) растянутость эпохи рекомбинации

После 400 тыс. лет уже нейтральный водород стал неупругим, перестал взаимодействовать с квантами и стал подчиняться только гравитации. Поэтому только с этого момента мог начаться рост неоднородностей.

**Момент рекомбинации был растянут во времени**, потому что кроме водорода был ещё и гелий, а у него два электрона на орбитах. Сначала через 18 тыс. лет после Большого взрыва на орбиту садился первый электрон, потом через 120 тыс. лет второй (рис. 13.18б). Но это всё не меняло количество электронов в плазме, потому что гелия было мало. А вот когда уже произошла рекомбинация в водороде, количество свободных электронов сократилось до нуля.

Из этого следует, что в тот момент при красном смещении в 1000–1100 были такие маленькие флуктуации температуры и плотности, что  $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$ . До наших дней вырасти в большие флуктуации  $\frac{\Delta \rho}{\rho} \sim 1$  они не могли.

Теорию гравитационной неустойчивости создал в начале 20 в. Дж. Джинс, пытаясь объяснить, как получаются звёзды. Но они получаются в неподвижном веществе, когда в облаке холодного газа гравитация начинает собирать вещество в комки, а плотность при этом нарастает экспоненциально быстро. А Вселенная расширяется, и здесь работает **теория гравитационной неустойчивости в расширяющемся пространстве** Е. Лившица, созданная к концу 40-х гг. Оказалось, что гравитационная неустойчивость работает медленно, и она за 1100 таких времён может только в 1100 раз увеличить плотность. Умножая это на  $10^{-5}$ , получаем, что к сегодняшнему дню **контраст плотности мог составить один процент**. А на самом деле есть галактики, а между ними почти пустота.

К счастью, астрономы уже начали обнаруживать **тёмное вещество** в пространстве. В 80-е гг. признаки тёмного вещества стали появляться уже на периферии нашей Галактики, а потом и в скоплениях галактик. Теперь мы знаем, что в нашу эпоху барионного вещества примерно в пять раз меньше, чем тёмного вещества, о природе которого мы пока мало что знаем (рис. 13.19). Значит, и в прошлом было также, в том числе и в эпоху рекомбинации. Тогда ещё были нейтрино и фотоны, но для гравитации это не важно.

Так как тёмного вещества было больше, именно **его гравитация** в ту эпоху **была определяющей**. Тёмное вещество не взаимодействует с фотонами, значит, эффект упругости фотонов, которые не давали обычным элементарным частицам сблизиться за счёт гравитации, для него не работал. Значит, **в тёмном веществе могла складываться структура** за счёт гравитации **намного раньше эпохи рекомбинации** обычного вещества.

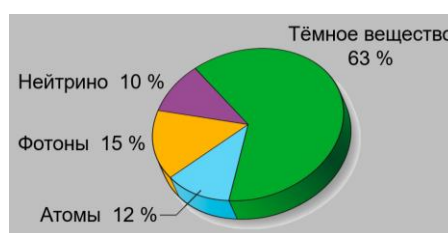


Рис. 13.19. Распределение вещества в эпоху рекомбинации

На рис. 13.20 показано, как мы сегодня представляем этот **процесс**. Если в первые секунды в тёмном веществе были хотя бы маленькие неоднородности плотности, к эпохе рекомбинации они должны были достаточно усилиться за счёт гравитации, а к эпохе формирования первых галактик в тёмном веществе уже были огромные перепады плотности. Поэтому, когда **обычное вещество** после рекомбинации получило возможность свободно двигаться, оно под действием гравитации тёмного вещества

начало стекаться туда, где уже сложились неоднородности плотности. Тогда получается непротиворечивая структура эволюции нашего мира.

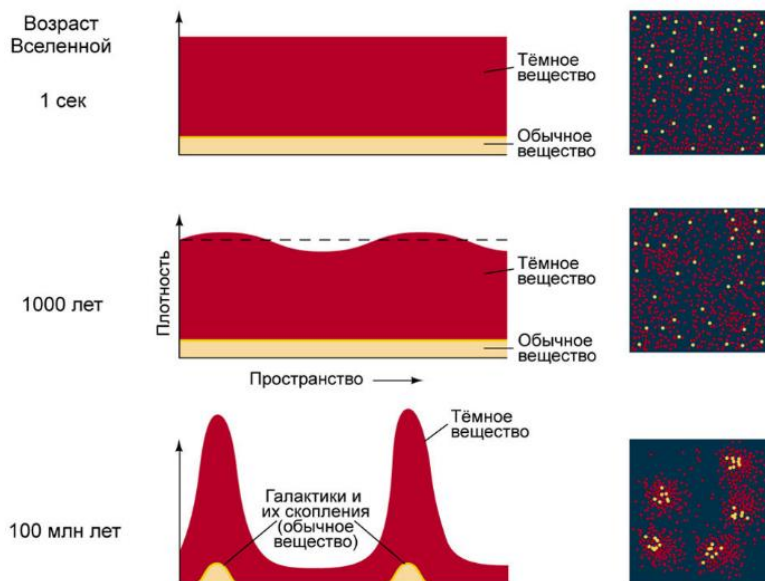


Рис. 13.20. Распределение тёмного и барионного вещества по мере эволюции Вселенной

После сливания обычного вещества из него сформировались звёзды, галактики, из маленьких галактик получились большие (рис. 13.21а).

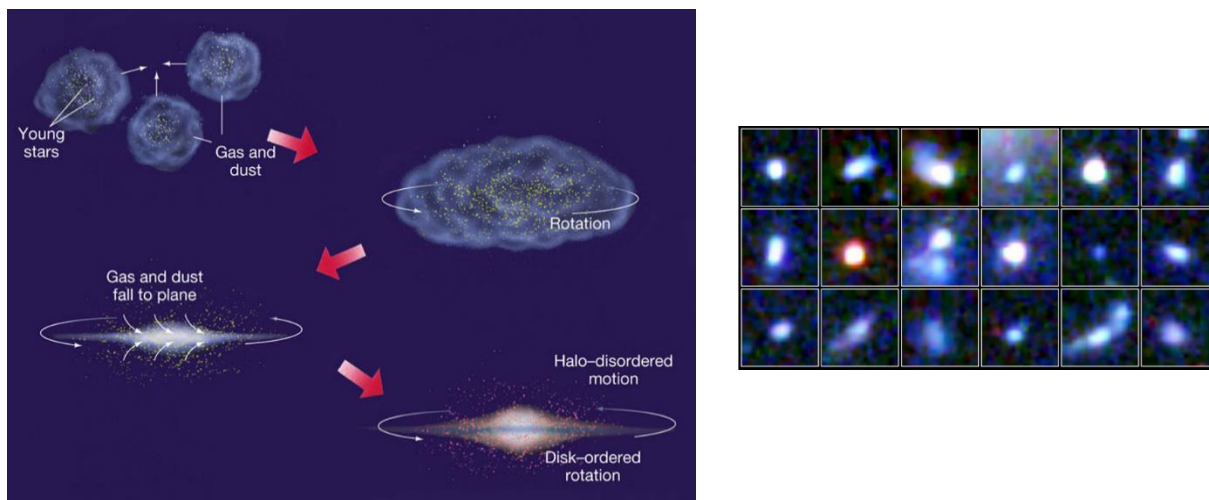


Рис. 13.21. Дальнейшее формирование звёзд и галактик из барионного вещества, б) Молодые галактики

Когда телескоп «Хаббл» смотрит в далёкое пространство, он видит, что **молодые галактики**, возраст которых, если считать от нас, 12,5–13 млрд лет, а то и больше, все **маленькие**, размером с Магеллановы облака и даже меньше (рис. 13.21б). А потом из них слипались всё более крупные структуры.

На рис. 13.22 представлена **последовательность событий от начала взрыва**.

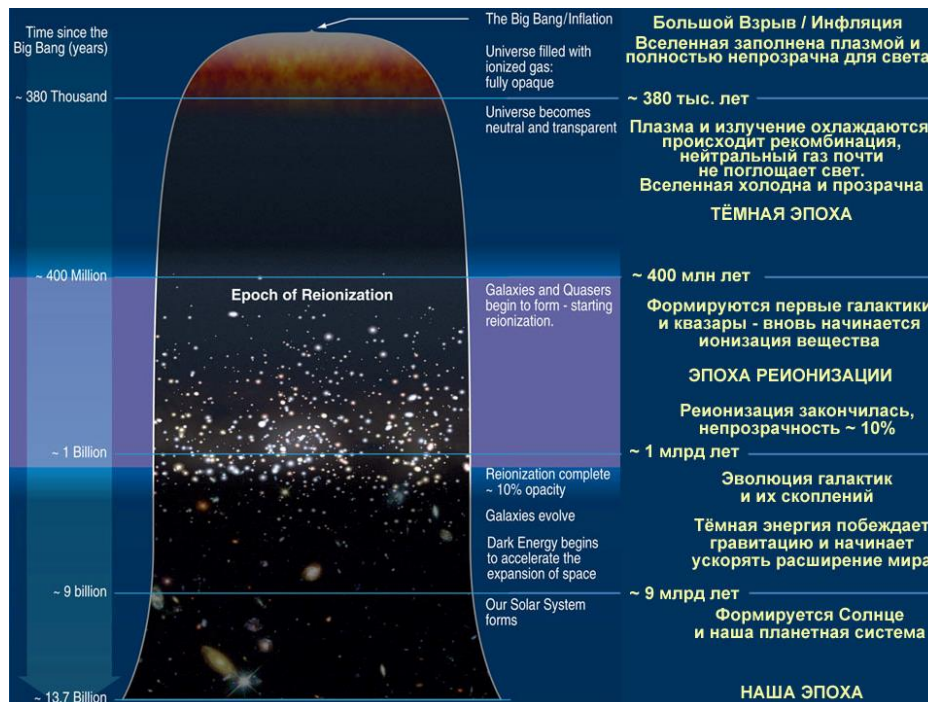


Рис. 13.22. Последовательность формирования Вселенной с момента Большого взрыва до нашей эпохи

Осталось объяснить, откуда в тёмном веществе **маленькая начальная неоднородность**. В. Муханов и А. Старобинский поняли, что это были **флуктуации вакуума**, о которых говорит квантовая теория. Вакуум неоднороден, энергия и плотность виртуальных частиц всё время пульсируют. Сначала флуктуации были очень маленькие, но с тех пор очень сильно выросли.

Раньше астрономы считали, что после Большого взрыва долго складывалась структура галактик, в какой-то момент началось формирование звёзд, дальше получились галактики. К нашей эпохе скорость формирования звёзд спадает, становится меньше вещества, из которого они могут сформироваться.

Но наблюдения показывают, что **чем дальше мы смотрим**, всё равно видим **галактики, наполненные звёздами** (рис. 13.23). Даже тогда, когда Вселенная недавно взорвалась и ещё была горячей, уже поделилась на отдельные фрагменты, и в них начали рождаться звёзды. Над этим ещё надо думать.

Ещё одна загадка – **сверхмассивные чёрные дыры**, которые мы наблюдаем в **ядрах далёких, а значит, очень молодых галактиках**. Звёзды рождаются из вещества недолго, а откуда там чёрные дыры? Ведь раньше представляли, что чёрная дыра – это продукт эволюции звезды. Происходит коллапс, и на месте массивной звезды образуется чёрная дыра с массой 3–10 масс Солнца. Но в ядрах галактик можно видеть чёрные дыры с массой в миллиарды масс Солнца.

Чёрная дыра растёт, захватывая окружающее вещество. Но чёрную дыру начиная с массы в 10 масс Солнца **нельзя вырастить за космологическое время**.

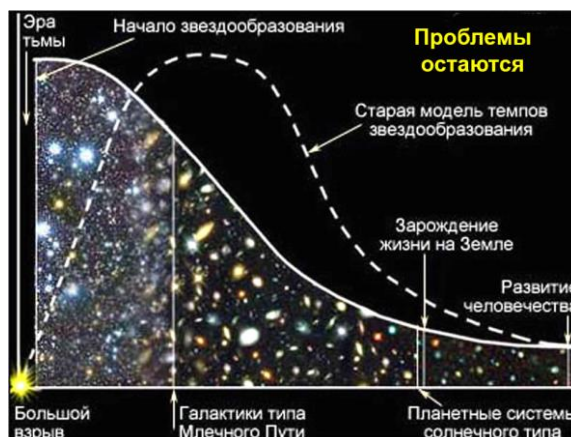


Рис. 13.23. Наблюдаемые эпохи формирования звёзд

### Варианты расширения Вселенной

Вселенная могла расширяться по-разному (рис. 13.24а). Она могла быть достаточно плотной, чтобы, расширяясь сегодня, через некоторое время остановить этот процесс и сжаться, реализуя фиолетовую траекторию. Если скорость небольшая, а вещества много, то оно тормозит расширение и оборачивает процесс назад. Если вещества во Вселенной мало, а скорость расширения большая, будет реализовываться синяя траектория – вечное расширение Вселенной.

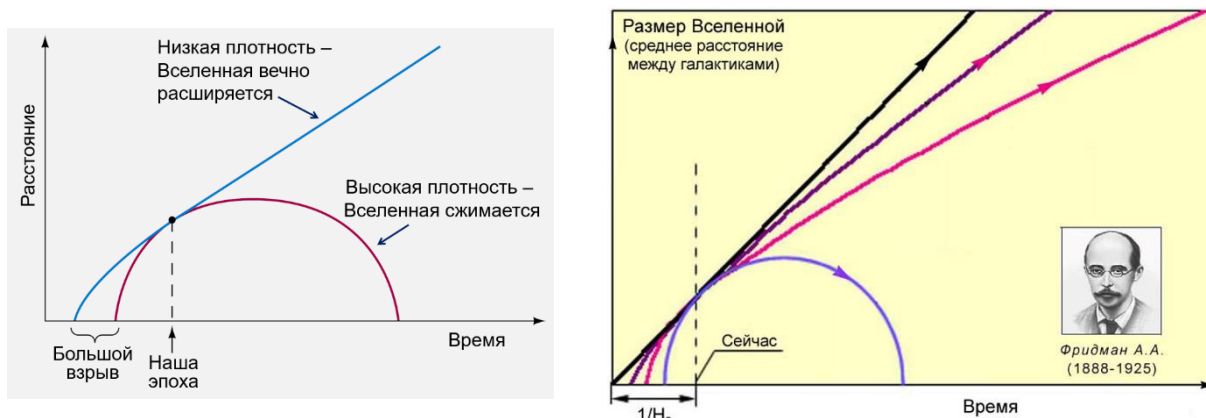


Рис. 13.24. Варианты эволюции Вселенной под действием гравитации, б) модель расширяющейся Вселенной А. А. Фридмана

Рассмотрим пример, когда на поверхности планеты произошёл взрыв, и частицы полетели вверх с разной скоростью. Если они летят с небольшой скоростью, то выходят на эллиптические орбиты и могут упасть обратно или выйти на орбиту, но далеко в любом случае не улетят. Если скорости любые большие, то частицы выходят на разные гиперболические орбиты. И только при определённой точно установленной скорости – второй космической – они выйдут на **параболическую орбиту**. Это граница между бесконечно большим количеством эллиптических и гиперболических орбит.

При случайном взрыве вероятность выйти на параболическую орбиту стремится к нулю, однако **Вселенная расширяется практически с параболической скоростью**.

Это надо объяснять в рамках общей теории относительности. Когда она была создана, первым построил модель расширяющейся Вселенной А. А. Фридман (рис. 13.24б). Он сделал это, зная, что был начальный взрыв и что сегодня мы наблюдаем разлёт. А дальше вариантов много – от замкнутых, приводящих обратно к сжатию Вселенной, до открытых моделей. Но он учитывал **только гравитацию**, А. Эйнштейн тогда выбросил член  $\Lambda g_{\mu\nu}$  из тензорных уравнений

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

Уже в нашу эпоху астрономы С. Пёрлмуттер, А. Рисс и Б. Шмидт решили проверить, действительно ли расширение Вселенной происходит с замедлением, как говорили все модели Фридмана.

В 1998 г. эти учёные измерили **расстояние до очень далёких галактик**, используя сверхновые как индикатор расстояния. Сверхновые взрываются, нарабатывается большое количество радиоактивных элементов, Ni распадается, за ним Co (рис. 13.25а). Кривая уменьшения яркости звезды складывается из нескольких экспонент и точно говорит, со сверхновой какого типа мы имеем дело.

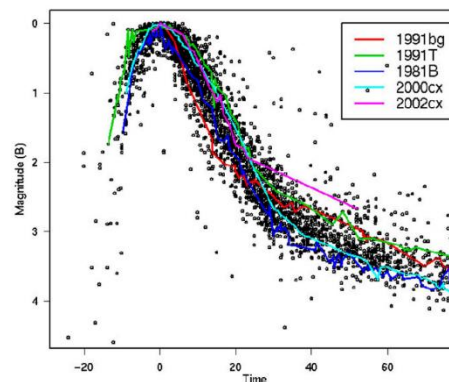
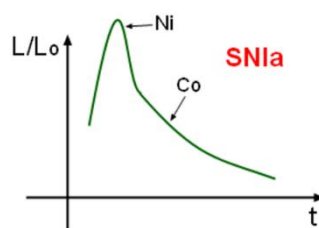


Рис. 13.25. Кривые яркости сверхновых (а), в том числе сверхновых типа Ia (б)

У сверхновых типа Ia, даже, как обычно бывает, пропустив момент максимальной вспышки, но наблюдая спадающую часть кривой и зная её экспоненциальный характер, можно восстановить максимум, а в максимуме они все примерно одинаковой светимости (рис. 13.25б). Поэтому **сверхновые типа Ia работают как индикатор расстояния**.

Оказалось, что **была эпоха, когда Вселенная расширялась с замедлением**, потому что тогда была большая плотность вещества и оно имело серьёзную гравитацию. Но к нашей эпохе реализуется верхняя кривая, остальные уже отброшены (рис. 13.26). Был момент, удалённый от нас в прошлое примерно на семь миллиардов лет, когда **расширение системы наблюдаемых галактик стало происходить с ускорением**.

Раньше астрономы думали, что знают, что Вселенная – это звёзды и ничего больше. Однако **звёзды – лишь легко наблюдаемые индикаторы** того, движение чего мы изучаем на самом деле. Можно провести аналогию с фарами автомобиля, которые представляют его малую часть, но в темноте несут информацию о динамике его

движения. Другая аналогия с бортовыми огнями самолёта, которые тоже говорят о динамике полёта, но ничего не могут сказать о его причине.

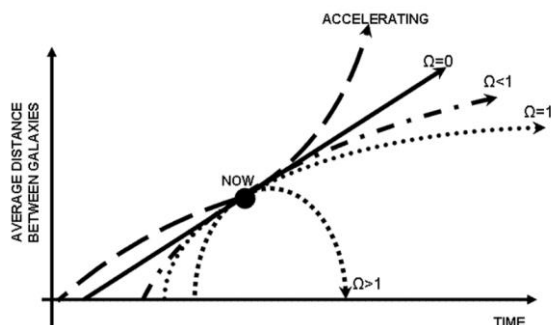


Рис. 13.26. Варианты расширения Вселенной, реализовался верхний

Изучая звёзды, астрономы поняли, что барионного вещества мало, примерно 5% (рис. 13.27а). Есть невидимое вещество, которое тоже обладает гравитацией, но пока неизвестно, что там за частицы. Однако расширение с ускорением может объясниться только тогда, когда в природе есть ещё какая-то сущность, на две трети по плотности энергии заполняющая Вселенную. Её назвали **тёмной энергией**.

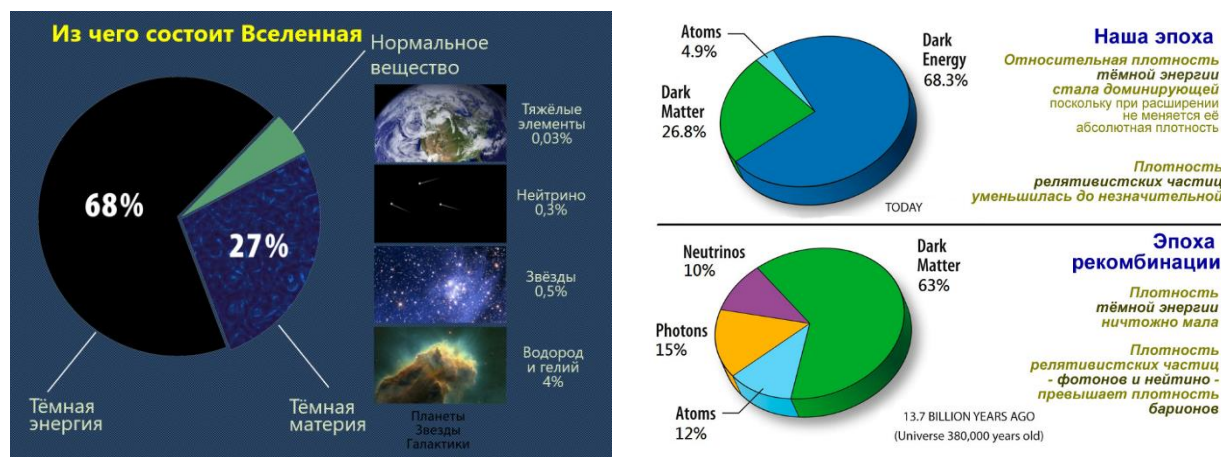


Рис. 13.27. а) состав Вселенной, б) распределение вещества в эпоху рекомбинации и в нашу эпоху.

Если мы правильно представляем себе поведение тёмной энергии, **в эпоху рекомбинации она себя почти не проявляла**. Тогда и тёмное, и обычное вещество было очень плотным, и они были главным руководителем динамики мира (рис. 13.27б).

Однако время шло, плотность обычного вещества за счёт расширения мира падала, а у тёмной энергии плотность никогда не меняется. Создаётся впечатление, что это свойство вакуума, а он, как его ни расширяй, всё равно остаётся вакуумом. И влияние тёмной энергии, судя по динамике движения галактик, нарастает со временем. В последние семь миллиардов лет именно антигравитационное влияние тёмной энергии вышло на первый план и расталкивает галактики.

На рис. 13.28 представлена условная картинка, показывающая данные этапы.

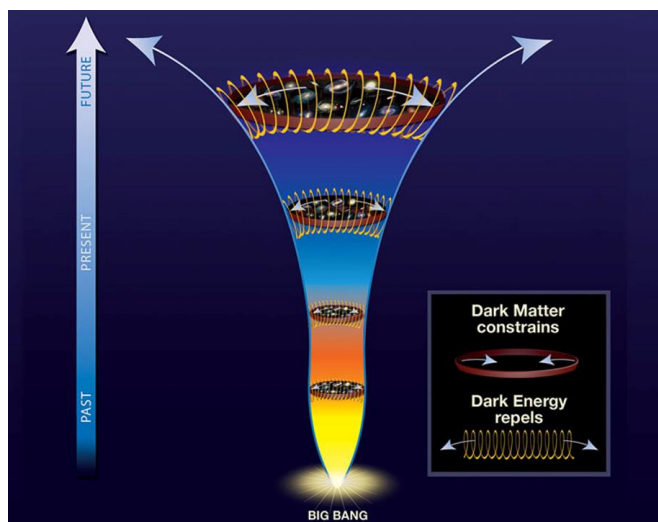


Рис. 13.28. Этапы расширения Вселенной под влиянием тёмной материи и тёмной энергии

На рис. 13.29а показана **карта неба в эпоху рекомбинации** с вычищенной из неё Галактикой. Надо объяснить начальные флуктуации. Видно, что есть мелкая рябь, есть более крупные области повышенной и пониженной температуры.

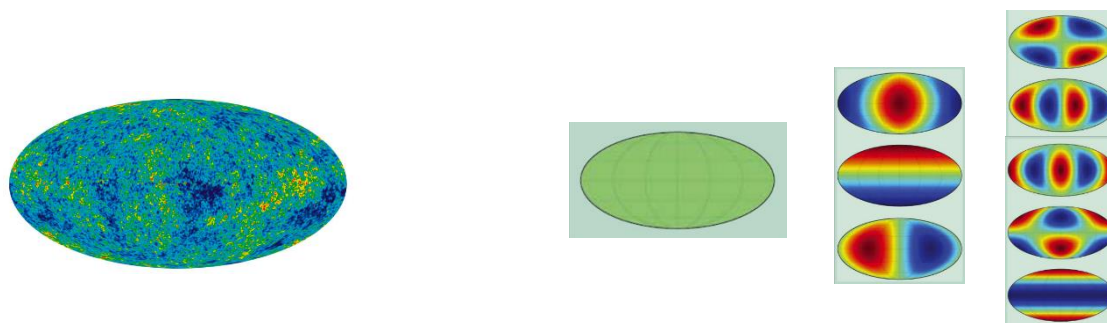


Рис. 13.29. а) карта неба в микроволновом диапазоне в эпоху рекомбинации, б) сферическая ( $l = 0$ ), дипольная ( $l = 1$ ) и квадрупольная ( $l = 2$ ) гармоники

Можно сделать Фурье анализ, то есть разложить по сферическим функциям и посмотреть, **на каких масштабах флуктуации сильнее**, а на каких слабее. Сначала рассматривается однородная пульсация шара (рис. 13.29б, слева), потом можно представить дипольные компоненты (рис. 13.29б, в центре), из которых одна расширяется, а другая сжимается, дальше мультипольные – большое количество мелких колебаний (рис. 13.29б, справа).

В итоге получается **график** на рис. 13.30, где по оси  $x$  номер мультиполя от самых крупных до самой мелкой ряби, а по оси  $y$  – их амплитуда. На начальном моменте теория с наблюдениями не очень совпадает, потому что там есть ещё влияния эффекта Доплера за счёт движения нашей Галактики. А на всём остальном пространстве высших мультиполей подтверждается теория В. Муханова, гласящая, что **первичные флуктуации на квантовом уровне по мере расширения Вселенной приобрели**



**макроскопические масштабы.** Одни звуковые волны усиливались в расширяющемся мире, другие не усиливались, если длина волны превосходила масштаб мира.

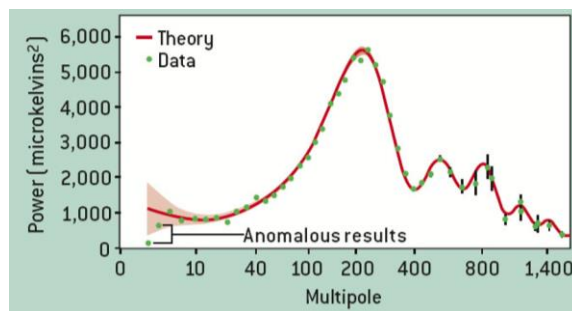


Рис. 13.30. Амплитуда мультиполей

## Теория инфляции

Сегодня мы видим с Земли в радиодиапазоне систему горячей плазмы с мелкими флуктуациями температуры на ней. Но было ещё более глубокое **прошлое, раньше 400 тыс. лет от момента Большого взрыва**. Сейчас у нас нет приборов, которые могли бы что-то оттуда получить. Но теоретически можно прийти к первому мгновению рождения нашего мира. Каким оно должно было быть, чтобы объяснить сегодняшние свойства, например, мелкие флуктуации плотности тёмного вещества, или то, что Вселенная с одной и другой стороны одинакова, хотя эти стороны не имели времени обменяться информацией, или плоскую геометрию пространства и времени, то есть то, что Вселенная расширяется по параболе?

Такие вещи ни одна теория объяснить не могла. Для объяснения геометрии Вселенной придумали **теорию инфляции** – стремительного расширения (рис. 13.31а). В момент рождения Вселенной она была заполнена каким-то полем, названным **инфлатоном**, которое обладало невероятной антигравитационной силой. Оно стремительно расширило наш мир, в котором ещё почти не было вещества, и само себя настолько сильно, что мир приобрёл гигантские размеры, и теперь, изучая его маленькую часть, доступную нам, мы всегда скажем, что Вселенная плоская. Всё остальное унеслось далеко, и **померить кривизну мы не можем**.

На рис. 13.31б показано, когда по представлениям учёных работала инфляция. **Эпоха инфляции** продолжалась с 0 до  $10^{-32}$  с, но за это время инфлатон раздул Вселенную, и энергия этого поля резко упала. Энергия не пропадает, поэтому из понизившейся энергии поля родилось вещество. Физика пока не в состоянии детально описать этот период.

Дальше с  $10^{-32}$  с до  $10^{-12}$  с была **эпоха рождения сил**, когда энергия инфляционного поля превратилась в разные силы взаимодействия. Из первоначально единого взаимодействия выделилось сильное ядерное, а затем электрослабое взаимодействие распалось на электромагнитную и слабую ядерную силы. Для описания данного периода у физиков уже есть некоторый теоретический задел.

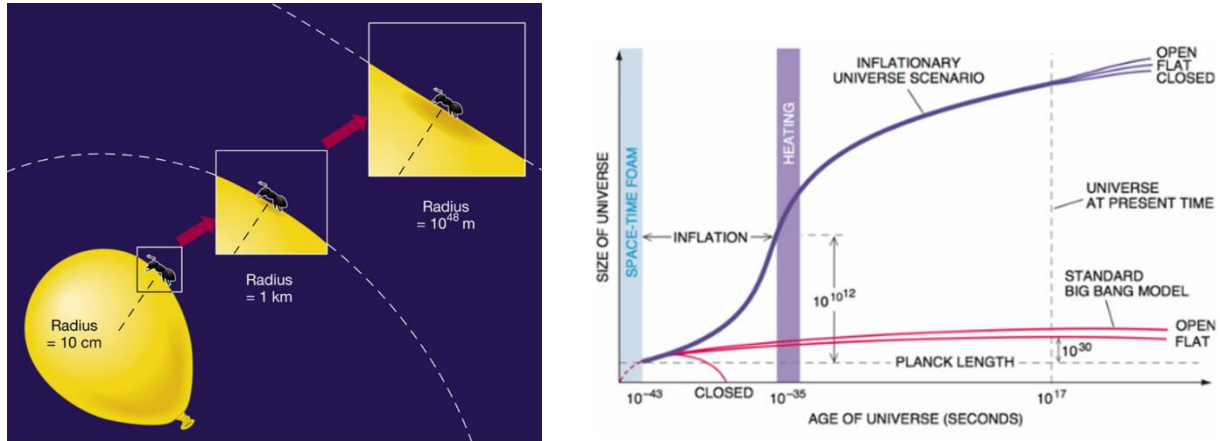


Рис. 13.31. а) изучение маленького участка Вселенной, б) первые эпохи рождения Вселенной

Дальше с  $10^{-12}$  с до 1 с была эпоха **рождения элементарных частиц**, когда энергия превращалась в частицы. Сначала в период  $10^{-12} - 10^{-6}$  с была эпоха **кварков**, из которых состоят протоны, нейтроны и другие массивные частицы (мезоны), и глюонов, служащих переносчиками взаимодействия. Потом во время  $10^{-6} - 1$  с наступила эпоха **адронов**,

Когда поле пропадает, рождаются пары частиц, поэтому мир тогда был очень симметричным: сколько вещества, столько и антивещества. А вещество с антивеществом проаннигилировало, и могло бы ничего не остаться кроме электромагнитных квантов, если бы это равенство было абсолютным. Откуда взялась **асимметрия вещества и антивещества** сегодня вопрос открытый.

Дальше в период с 1 с до 10 с наступила эпоха **лептонов**. Температуры и плотности уже были нормальными, ядерная физика хорошо работала. Тогда рождались и аннигилировали лептоны и антилептоны, в основном электроны и позитроны.

Каждые сутки мы видим световые сутки дальше во Вселенную, но её граница унеслась на такое расстояние, что до неё никогда не доберётся (рис. 13.32).

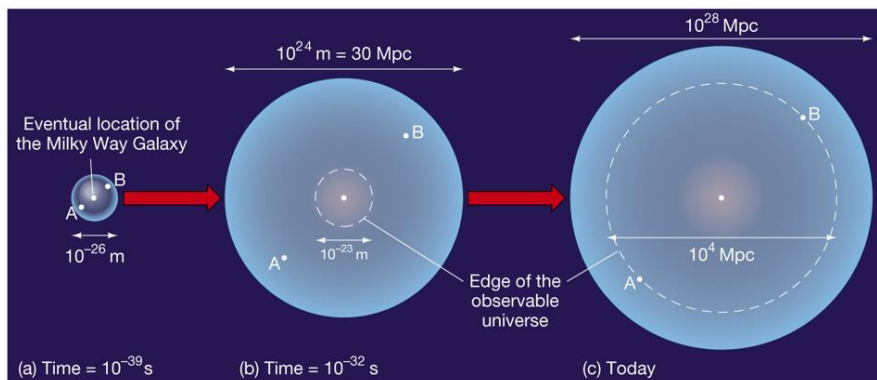


Рис. 13.32. Инфляция отодвинула границу мира значительно дальше границы наблюдаемой Вселенной

Сегодня астрономы считают, что **расширение будет происходить всегда, и оно будет всегда ускорено**. Но теоретически можно представить, что это не так (рис. 13.33а). Надо как можно более точно изучать далёкое прошлое и динамику вещества в нашу и соседние с ней прошлые эпохи.

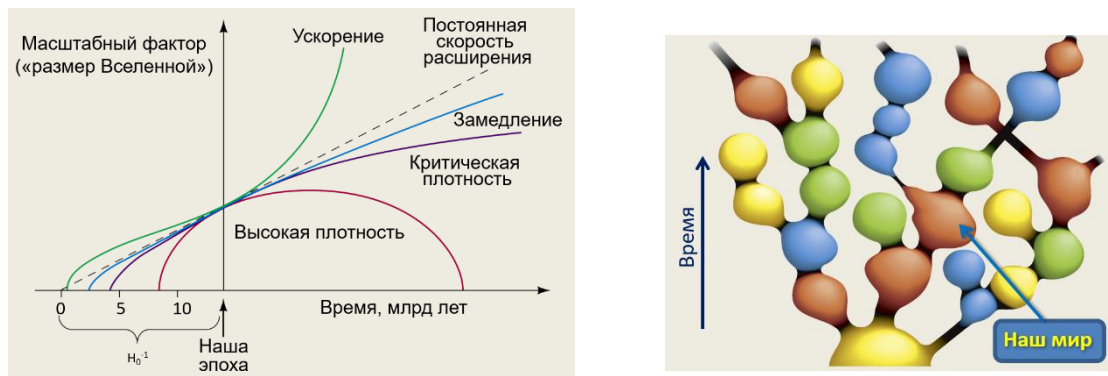


Рис. 13.33. а) теоретические варианты дальнейшего расширения Вселенной, б) фрактальная Вселенная

Значения физических постоянных ( $c, h, G, k, e$ ), массы элементарных частиц ( $m_p, m_n, m_e \dots$ ) и плоская геометрия пространства и времени как-то очень хорошо настроены. **Если бы физические константы были чуть-чуть другими, мир бы стал совсем другим**. Не так бы шли ядерные реакции, не возникало бы ничего, кроме водорода и гелия и т. д. Почему есть массы элементарных частиц – понятно, а почему именно такие, чтобы шли термоядерные реакции или долго светили звёзды, – загадка.

**Антропный принцип** говорит: «Иначе наш мир был бы не таким, каков он есть (сложный и разнообразный) и не было бы жизни». Однако это не физическое решение проблемы.

А. Д. Линде выдвинул гипотезу, что вселенных может быть много, и набор физических констант может быть в каждой разным. Он предложил **Фрактальную Вселенную** – вечно рождающиеся вселенные, связанные, а порой несвязанные друг с другом, каждая из которых как-то живёт (рис. 13.33б).

Одни вселенные быстро схлопываются, другие разлетаются так, что в них не успевает ничего образоваться. И какая-то среди них случайно образует именно такую динамику расширения и такие физические константы и массы элементарных частиц, которые соответствуют нашему миру, благоприятному для развития жизни.



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ