

Введение

1 Об астрономии

1.1 Предмет астрономии

Астрономия (astron (гр.) – звезда, светило и nomos (гр.) – закон) – наука, изучающая расположение, движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и образованных ими систем, Вселенной в целом.

1.2 Метод астрономии

1.3 Связь астрономии с другими науками

Астрономия и физика, математика, химия, история, геология и пр.

1.4 Значение астрономии

Мировоззренческое значение (создание научной картины мира); фундаментальное – исследование явлений и вещества в условиях, недостижимых на Земле, открытие фундаментальных законов (примеры – закон всемирного тяготения, новые химические элементы, гравитационное линзирование, расширение Вселенной и пр.); практическое – ориентация на Земле и в космосе, измерение времени, спутниковая связь, поддержка космонавтики и пр.; общекультурное – мифология, литература, устная речь пронизаны терминами, сравнениями, сюжетами, взятыми у астрономии (зенит, кульминация, апогей, затмение и т.д.).

1.5 Разделы астрономии

Астрометрия, небесная механика, звездная астрономия, астрофизика, космология. Разделы по объектам исследования – планетология, физика звезд, внегалактическая астрономия и пр.; по спектральным диапазонам – оптическая астрономия, радиоастрономия, ИК-астрономия, рентгеновская астрономия и пр.

2 Профессиональная астрономия

2.1 Подготовка астрономических кадров

Университетское образование, сетка ученых степеней и званий, РАН. Сравнение с западной системой образования. Гранты.

2.2 Астрономические учреждения

Обсерватории и институты, крупнейшие телескопы.

2.3 Общественные организации астрономов

МАС (IAU), AAS, Евразийское астрономическое общество.

2.4 **Астрономическая информация**

Научные издания – журналы, труды конференций, монографии и учебники. Электронные версии журналов, библиографические базы данных, специализированные базы данных.

Несколько полезных сайтов:

<http://www.stsci.edu/science/net-resources.html> – астрономические ресурсы в интернете

<http://www.inasan.rssi.ru/rus/rvo/organisations.html> – астрономические организации России

<http://www.astronet.ru> – астрономический образовательный сайт (новости астрономии, многочисленные популярные статьи и книги)

<http://library.stsci.edu/lib/Ejournalist.html> – электронные версии основных профессиональных астрономических журналов

http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html – крупнейшая библиографическая база данных в области астрономии

<http://arxiv.org/> – база данных электронных препринтов (только естественные науки)

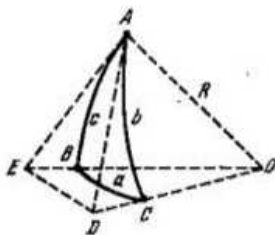
2.5 **Астрономическое отделение СПбГУ**

История, кафедры, Астрономический институт – <http://www.astro.spbu.ru>.

Гл. 1. **Элементы сферической астрономии**

1 **Основные формулы сферической тригонометрии**

1.1 **Сферические треугольники**



Большой круг, малый круг, сферический треугольник (СТ), вершины и стороны СТ, площадь СТ.

Рис. 1: Сферический треугольник ABC

1.2 **Формулы косинусов**

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

$$\cos b = \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B$$

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C$$

1.3 **Формула синусов**

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c}$$

1.4 Формулы пяти элементов

$$\sin b \cos A = \cos a \sin c - \sin a \cos c \cos B$$

$$\sin c \cos B = \cos b \sin a - \sin b \cos a \cos C$$

$$\sin a \cos C = \cos c \sin b - \sin c \cos b \cos A$$

или

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A$$

$$\sin b \cos C = \cos c \sin a - \sin c \cos a \cos B$$

$$\sin c \cos A = \cos a \sin b - \sin a \cos b \cos C$$

1.5 Плоская тригонометрия

Связь формул сферической и плоской тригонометрии.

2 Небесная сфера

2.1 Понятие небесной сферы

НС – сфера произвольного радиуса с центром в точке наблюдения, на которую проектируются небесные объекты.

2.2 Основные точки и круги на небесной сфере

Отвесная линия, зенит и надир, математический горизонт, альмукантарат, вертикал, ось мира, северный и южный полюса мира, небесный экватор, суточная параллель, часовой круг (круг склонений), небесный меридиан, полуденная линия, вертикалы, эклиптика, точки осеннего и весеннего равноденствия и пр.



Рис. 2: Небесная сфера

3 Небесные координаты

3.1 Важнейшие системы небесных координат

Географическая (ϕ, λ) , горизонтальная $(h(z), A)$, первая (t, δ) и вторая (α, δ) экваториальная, эклиптическая (β, λ) , галактическая (b, l) системы координат.

3.2 Преобразование координат

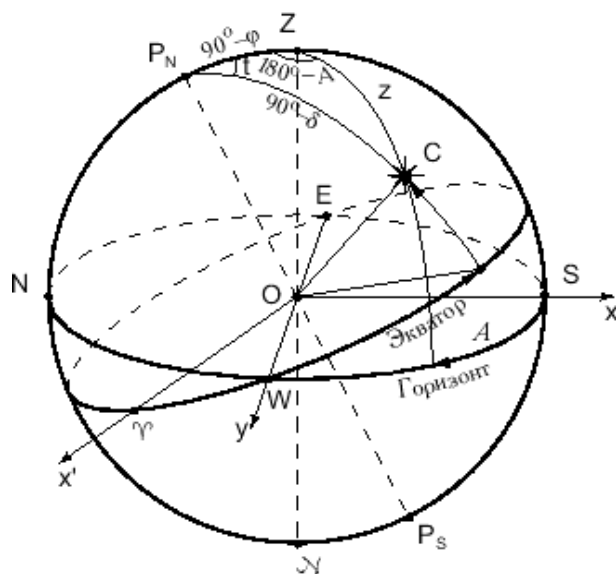


Рис. 3: Параллактический треугольник

Параллактический треугольник – треугольник на небесной сфере, образованный пересечением небесного меридиана, вертикального круга и часового круга светила ($P_N Z C$ на рис. 3).

Применение формул сферической тригонометрии к параллактическому треугольнику позволяет найти формулы связи координат (горизонтальных и экваториальных для примера на рис. 3).

4 Суточное движение светил

4.1 Восход, заход, кульминация светил

В. – светило пересекает математический горизонт, переходя из невидимого полушария НС в видимое; з. – переход из видимого в невидимое полушарие. Кульминация – пересечение светилом небесного меридиана. Верхняя и нижняя к.

4.2 Изменение координат светил при суточном движении

4.3 Координаты светила в кульминациях

Часовой угол (0^h – верхняя кульминация, 12^h – нижняя), азимут (0° – верхняя кульминация, 180° – нижняя), высота (зенитное расстояние) в кульминациях – 4 варианта (верхняя кульминация к югу и к северу от зенита, нижняя кульминация к северу и к югу от надира).

Условия восхода и захода светил:

$|\delta| \geq 90^\circ - |\phi|$ – незаходящие и невосходящие светила,

$|\delta| < 90^\circ - |\phi|$ – восходящие и заходящие светила.

5 Видимое движение Солнца

5.1 Изменение экваториальных координат Солнца

Эклиптика, зодиакальные созвездия, α и δ в дни солнцестояний и равноденствий:

$\alpha_\odot = 0^h, \delta_\odot = 0^\circ$ (20/21 марта – день весеннего равноденствия),

$\alpha_\odot = 6^h, \delta_\odot = 23^\circ 26'$ (21/22 июня – день летнего солнцестояния),

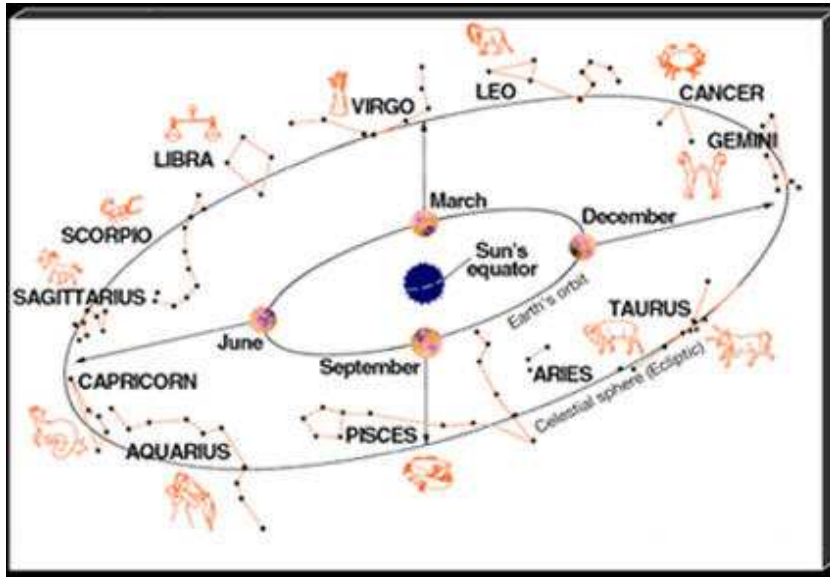


Рис. 4: Зодиакальные созвездия

$\alpha_{\odot} = 12^h, \delta_{\odot} = 0^{\circ}$ (23 сентября – день осеннего равноденствия),
 $\alpha_{\odot} = 18^h, \delta_{\odot} = -23^{\circ}26'$ (22 декабря – день зимнего солнцестояния).

5.2 Видимость Солнца на разных широтах

Полярный день и ночь, северный и южный полярные круги ($\phi = \pm 66^{\circ}34'$), северные и южные тропики ($\phi = \pm 23^{\circ}26'$).

6 Время

6.1 Принципы измерения времени

Основа – периодический процесс (вращение Земли вокруг оси – звездное время, обращение Земли вокруг Солнца – солнечное время, частоты излучения атомов, радиоизлучение пульсаров и пр.).

6.2 Звездное время

Звездное время (s) – часовой угол точки весеннего равноденствия, $s = t_{\gamma} = \alpha + t$.

Звездные сутки – промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия (на одном и том же географическом меридиане).

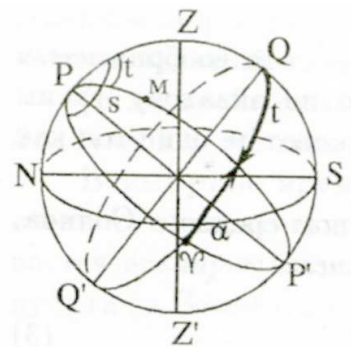


Рис. 5: Связь звездного времени с α и t светила

6.3 Истинное солнечное время

Истинное солнечное время на данном меридиане – часовой угол центра диска Солнца, увеличенный на 12 часов: $T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h$. В момент верхней кульминации Солнца (истинный полдень) $t_{\odot} = 0^h$.

Истинные солнечные сутки – промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра солнечного диска.

Неравномерность орбитального движения Земли – продолжительность истинных солнечных суток меняется в течение года в пределах ± 25 с.

6.4 Среднее солнечное время

Среднее эклиптическое солнце равномерно движется по эклиптике со средней скоростью истинного Солнца и совпадает с ним около 3 января и 4 июля. Среднее экваториальное солнце – точка, равномерно двигающаяся по небесному экватору с постоянной скоростью среднего эклиптического солнца и одновременно с ним проходящая точку весеннего равноденствия.

Среднее солнечное время – часовой угол среднего экваториального солнца, увеличенный на 12 часов: $T_m = t_m + 12^h$.

Средние солнечные сутки – промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего экваториального солнца.

6.5 Связь истинного и среднего солнечного времени

$\eta = T_m - T_{\odot}$ – уравнение времени.

$T_m = t_{\odot} + 12^h + \eta$ – среднее солнечное время.

Экстремальные значения – $\eta = +14^m$ около 11 февраля и $\eta = -16^m$ 2 ноября.

6.6 Связь звездного и среднего солнечного времени

Тропический год – промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра диска истинного Солнца через точку весеннего равноденствия.

1 тропический год = 365.2422 ср. солн. суток = 366.2422 звездных суток.

Звездные сутки короче средних солнечных на $3^m 56^s$.

6.7 Местное, всемирное, поясное, декретное, летнее время

Местное среднее солнечное время – $T_m = UT + \lambda$, где UT – всемирное время (местное среднее солнечное время гринвичского меридиана), λ – географическая долгота.

Поясное время: $T_n = UT + n^h$, n – номер часового пояса.

Декретное время: поясное + 1 час, летнее: +1 час на летний период.

6.8 Другие шкалы времени

Международное атомное (Time Atomic International), всемирное координированное (Universal Time Coordinated), динамическое и пр. времена.

7 Календарь

7.1 Принципы построения календаря

К. – система счета длительных промежутков времени. Лунные, солнечные, лунно-солнечные календари. Основа календаря – средние солнечные сутки, тропический год (1 тр. год = 365.2422 ср. солн. суток).

7.2 Юлианский календарь

Ю. к. (старый стиль) – 3 года по 365 дней, затем год 366 дней (високосный). Средняя продолжительность – 365.2500 ср. солн. суток. Юлианский год длиннее тропического на $\approx 11^m 14^s$, за 128 лет набегают разница в 1 сутки, за 400 лет – примерно 3 суток.

7.3 Григорианский календарь

Г. к. (новый стиль) – отличие от ю. к. в том, что не считаются високосными годы, номера которых кратны 100, кроме тех, номера которых кратны 400 (1700, 1800, 1900 – не високосные, 1600, 2000 – високосные). Средняя продолжительность – 365.2425 ср. солн. суток. Григорианский год длиннее тропического всего на 26^s , сдвиг на 1 сутки произойдет лишь за 3300 лет.

7.4 Начало отсчета лет

1 января 1 года н.э. (от Р.Х.), нулевого года нет.

7.5 Юлианские дни

Дни, считающиеся непрерывно с 1 января 4713 г. до н.э. (JD).

7.6 Линия перемены даты

Пересечение с запада на восток – уменьшить календарное число, с востока на запад – увеличить на единицу.

Гл. 2. Элементы астрометрии

1 Задачи и методология астрометрии

Создание пространственно-временной системы отсчета (ПВСО), то есть реализация теоретических пространственно-временных систем координат в виде системы отсчета; изучение геометрических и кинематических характеристик небесных тел.

2 Меридианная астрометрия

2.1 Меридианный круг

Измерение моментов кульминаций и зенитных расстояний в кульминациях.

2.2 Пассажный инструмент

Измерение моментов кульминаций.

2.3 Астрономические часы

Маятниковые, хронометры, кварцевые, атомные. Поправка часов, ход часов.

3 Абсолютные и относительные методы определения координат

3.1 Абсолютный метод определения склонений

Наблюдения звезд в кульминациях $\rightarrow \phi$ и δ .

3.2 Абсолютный метод определения прямых восхождений

Наблюдения Солнца $\rightarrow \alpha_{\odot}, \delta_{\odot} \rightarrow$ калибровка звездного хронометра \rightarrow наблюдения главных (часовых) звезд и нахождение их α .

3.3 Относительные методы определения координат

Измерение разности координат определяемых и опорных звезд.

4 Астрономические редукции и астрономические постоянные

4.1 Рефракция и другие атмосферные эффекты

Рефракция – преломление световых лучей при прохождении земной атмосферы (ρ). Для простой модели атмосферы (плоскопараллельные слои) $\rho \approx 60'' \operatorname{tg} z'$, где z' – видимое зенитное расстояние светила ($z' < 70^\circ$). Вблизи горизонта $\rho \approx 35'$ – больше углового диаметра Солнца. Дифференциальная рефракция.

Мерцание, дрожание.

4.2 Аберрация света

Аберрация – смещение направления на светило для движущегося наблюдателя (σ).

$\sigma = \frac{v}{c} \sin \theta$, где v – скорость наблюдателя, θ – угол между направлением на светило и направлением движения наблюдателя.

Суточная аберрация $\sigma = 0.''3 \cos \phi \sin \theta$ (ϕ – географическая широта) – суточное вращение Земли;

годовая аберрация $\sigma = 20.''5 \sin \theta$ – годовое движение Земли по орбите;

вековая аберрация – движение звезды в пространстве.

4.3 Параллакс

Изменение направления на светило, вызванное перемещением точки наблюдения, – параллактическое смещение. Суточный параллакс, годичный параллакс (рис. 6).

Парсек (пк) – расстояние до объекта, годичный параллакс которого равен $1''$ ($1 \text{ ПК} = 206264.8 \text{ а.е.}$).

Связь годичного параллакса (π'' – параллакс в секундах дуги) и расстояния до объекта (D – расстояние в парсеках):

$$\pi'' = \frac{1}{D}.$$

Для ближайшей звезды (Проксима Центавра) $\pi = 0.''772$ и, следовательно, $D = 1.3 \text{ ПК}$ (4.2 светового года).

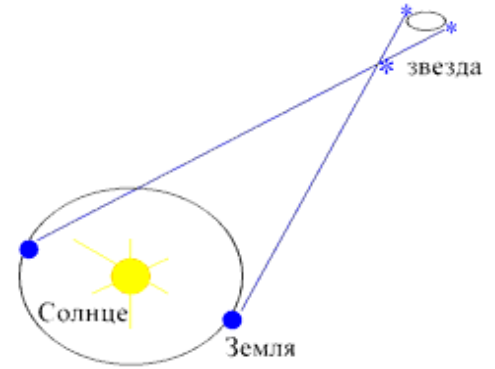


Рис. 6: Годичный параллакс светила

4.4 Прецессия и нутация

П. и н. – изменение направления оси вращения Земли, вызванное влиянием Луны, Солнца и планет. Период прецессии около 26000 лет, полураствор конуса $23^{\circ}26'$. Предварение равноденствий. Главное нутационное колебание – период 18.6 года, эллипс с осями $18.''4 \times 13.''7$.

4.5 Собственные движения звезд

Изменение координат, обусловленное движением звезды в пространстве (угл. сек. в год). Наибольшее собственное движение – $\mu = 10.''3/\text{год}$ (звезда Барнарда).

Связь тангенциальной скорости звезды (в км/с) и ее собственного движения – $v_t = 4.74 \cdot D \cdot \mu$, где D – расстояние до звезды в ПК, μ – в $''/\text{год}$.

4.6 Астрономические постоянные

Системы фундаментальных астрономических постоянных.

5 Общая схема построения ПВСО

Наблюдения, определение абсолютными методами α и δ опорных звезд, редукция координат к центру Земли (рефракция, суточная аберрация, суточный параллакс), редукция к барицентру Солнечной системы (годичная аберрация, годичный параллакс), нутация, прецессия и собственные движения, каталог звезд, фундаментальный каталог.

ПВСО \approx фундаментальный каталог + шкала времени + теория астрономических редукций + значения астрономических постоянных. Современные ПВСО.

6 Новые инструменты и методы астрометрии

6.1 Лазерная локация Луны и ИСЗ

Точность измерения расстояний $\sim 1\text{--}10 \text{ см}$.

6.2 Радиолокация ИСЗ, КА и планет

Точность оценки расстояний ~ 1 км. Период вращения, карта поверхности Венеры.

6.3 Радиоинтерферометрия

Принцип – одновременные наблюдения объекта на двух и более радиотелескопах. Разрешающая способность определяется максимальным расстоянием между инструментами. Погрешность определения координат радиоисточников $\sim 0.''001$.

6.4 Астрометрические спутники

HIPPARCOS (High Precision PARallax Collecting Satellite): каталог HIPPARCOS – координаты, собственные движения и параллаксы (точность $\sim 0.''001$) для 118 218 звезд, каталог TYCHO – менее точные сведения для $\sim 10^6$ звезд.

Будущее – проект GAIA: фотометрия для примерно 1 млрд. объектов с $V \leq 20^m$, точность позиционных наблюдений – 4 мкс ($V \leq 10^m$), 12–25 мкс ($V \leq 15^m$), 300 мкс ($V \leq 20^m$).

6.5 Новые теоретические идеи

Релятивистская астрометрия.

Гл. 3. Земля как небесное тело

1 Размеры, форма и гравитационное поле Земли

1.1 Геометрическая фигура Земли

Градусные измерения (Эратосфен), триангуляция, спутниковые методы. Размеры земного эллипсоида: $a = 6378$ км, $b = 6357$ км, сжатие $\epsilon = 1/298$.

1.2 Динамическая фигура Земли

Понятие геоида.

1.3 Уточнение понятия широты

Геоцентрическая, геодезическая, астрономическая широта.

2 Приливы

Ньютоновская модель приливов. Роль приливных явлений в астрономии (вековое замедление вращения Земли, вращение Луны, кольца планет-гигантов, тесные двойные звезды, взаимодействующие галактики).

3 Дополнительные сведения о вращении Земли

3.1 Неравномерность вращения Земли

Вековые, сезонные, иррегулярные неравномерности.

3.2 Движение полюсов и изменяемость широт

Периодический характер движения полюсов и колебаний географических широт – 14 мес. период (период Чандлера) и 12 месячный. Амплитуда изменений $\phi - \pm 0.''3$.

Гл. 4. Элементы небесной механики

1 Задачи и методология небесной механики

Основная задача – задача N тел. Общий метод решения задачи N тел. Методы исследования уравнений движения (аналитические, качественные, численные). Частные случаи – задача одного тела, задача одного неподвижного центра, задача двух тел, задача трех тел.

2 Задача двух тел

2.1 Уравнение движения

Вывод уравнения движения для разных задач. Общая форма: $\ddot{\vec{r}} + \frac{\kappa^2 \vec{r}}{r^3} = 0$, где $\kappa^2 = GM$ для задачи одного неподвижного центра, $\kappa^2 = G(M_1 + M_2)$ (уравнение относительного движения), $\kappa^2 = \frac{GM_1^3}{(M_1 + M_2)^2}$ (уравнение барицентрического движения).

2.2 Интеграл площадей

$\vec{r} \times \dot{\vec{r}} = \vec{c}$, где \vec{c} – постоянный вектор. Важнейшее следствие: движение в задаче двух тел – плоское.

2.3 Интеграл энергии

Вывод интеграла энергии: $\frac{v^2}{2} - \frac{\kappa^2}{r} = \frac{h}{2}$, $h = \text{const}$

2.4 Интегралы площадей и энергии в полярных координатах

$$r^2 \dot{\theta} = c, \quad \dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2 = 2 \frac{\kappa^2}{r} + h$$

2.5 Форма орбиты

Вывод уравнения для формы орбиты в задаче двух тел из интегралов площадей и энергии в полярных координатах. Результат – уравнение конического сечения $r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$, где e – эксцентриситет, p – параметр орбиты (первый закон Кеплера)).

2.6 Определение постоянной энергии

Постоянная в интеграле энергии: $h = -\frac{\kappa^2}{a}$, a – большая полуось орбиты.

Окончательный вид интеграла энергии: $v^2 = \kappa^2\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)$.

2.7 Связь со временем

Вывод второго (постоянство секторной скорости) и третьего ($\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\kappa^2}$, где P – сидерический период обращения двух тел) законов Кеплера.

2.8 Элементы орбиты

Кеплеровские элементы орбиты – $a, e, \omega, i, \Omega, T_0$.

3 Возмущенное движение

3.1 Метод возмущений

Ищутся не характеристики реального движения тел, а возмущения – отклонения от невозмущенного (кеплеровского) движения.

3.2 Метод оскулирующих элементов

В каждый момент движение происходит по касательной к кеплеровскому эллипсу, реальная траектория рассматривается как огибающая семейства эллипсов.

Гл. 5. Движение тел Солнечной системы

1 План Солнечной системы

Особенности движения планет, спутников, астероидов, комет – большие полуоси орбит, эксцентриситеты, наклоны, направление движения.

2 Конфигурации и видимое движение планет

2.1 Конфигурации планет

Нижние планеты – соединения, элонгации, верхние планеты – соединения, противостояния, квадратуры.

2.2 Уравнение синодического движения

$$\frac{1}{S} = \left| \frac{1}{P} - \frac{1}{P_{\oplus}} \right|,$$

S – синодический период обращения планеты, P – сидерический период обращения планеты, P_{\oplus} – сидерический период обращения Земли.

2.3 Видимое движение планет

Объяснение конфигураций, прямых и попятных движений планет.

3 Движение Луны

3.1 Движение Луны в пространстве

Невозмущенная орбита Луны: $a = 384400$ км, $e = 0.055$, $i = 5^\circ 09'$, $P = 27.^d3$, скорость движения по орбите ~ 1 км/с.

Периодические возмущения (например, $i = 4^\circ 58' - 5^\circ 20'$ за полгода), вековые возмущения (долгота восходящего узла совершает полный оборот за 18.6 лет, долгота перигея – за 8.9 лет).

3.2 Видимое движение и фазы Луны

Фазы Луны (новолуние, первая четверть, полнолуние, последняя четверть), сидерический и синодический месяцы, сизигии и квадратуры.

4 Затмения

4.1 Солнечные затмения

Полное, кольцеобразное, частное затмения, продолжительность затмений (обычно две-три минуты).

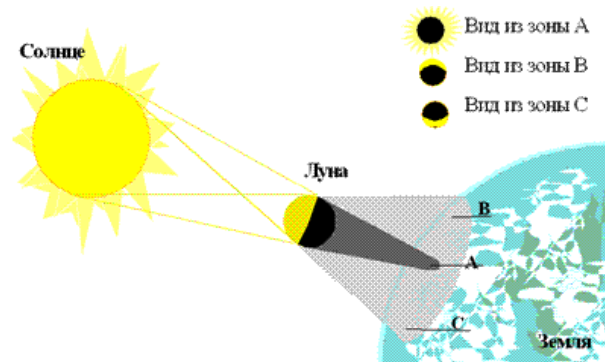


Рис. 7: Схема солнечного затмения

4.2 Лунные затмения

Полное и полутеневое затмения, продолжительность затмений (до двух часов).

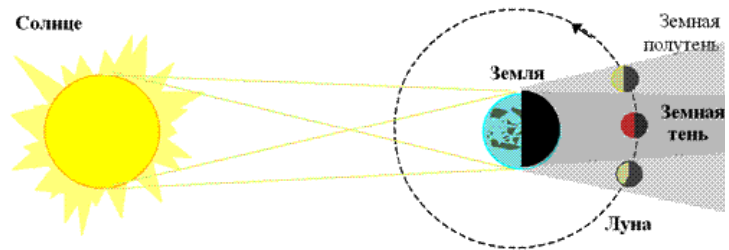


Рис. 8: Схема лунного затмения

4.3 Условия наступления затмений

Необходимое условие – новолуние (солнечное), полнолуние (лунное). Из-за наклона орбиты Луны затмения наступают лишь тогда, когда Луна находится вблизи узлов орбиты, то есть недалеко от эклиптики.

Солнечные затмения происходят от 2 до 5 раз в год, лунные – от 0 до 3 раз в год.

5 Движение ИСЗ и КА

5.1 Первая и вторая космические скорости

Минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно стало ее спутником: $v_1 = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \approx 7.9$ км/с – первая космическая скорость.

Минимальная скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно ушло от нее на бесконечность: $v_2 = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = \sqrt{2}v_1 \approx 11.2$ км/с – вторая космическая скорость.

5.2 Движение ИСЗ

Орбиты спутников, геостационарные ($a \approx 42000$ км, $e = 0$, $i = 0^\circ$, $P = 24^h$) и геосинхронные спутники. Возмущения в движении ИСЗ.

5.3 Сферы действия планет

5.4 Третья и четвертая космические скорости

v_3 – минимальная геоцентрическая скорость, которую нужно сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно покинуло Солнечную систему (≈ 16.7 км/с).

v_4 – минимальная геоцентрическая скорость, которую нужно сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно упало на Солнце (≈ 31.8 км/с).

5.5 Межпланетные полеты

Гомановские траектории, перелет и перехват, гравитационный маневр.

Гл. 6. Физические основы астрофизики

Дагер, Ньепс – фотография (1839, 1840); Погсон – шкала звездных величин (1856); Цельнер – визуальный звездный фотометр (1861); Кирхгоф, Бунзен – спектральный анализ (1861); Локьер – открытие He на Солнце (1869). Россия: Бредихин (1831–1904), Белопольский (1854–1934).

1 Шкала электромагнитных волн

Электромагнитное излучение как волны ($\lambda\nu = c$) и как поток частиц ($E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, $h = 6.63 \cdot 10^{-27}$ эрг с – Постоянная Планка).

Шкала электромагнитного излучения, пропускание атмосферой излучения с разными длинами волн.

Оптический диапазон $\lambda \approx 3900\text{\AA} - 7600\text{\AA}$, соответствующие энергии квантов $\sim 3 \text{ эВ} - 1.5 \text{ эВ}$.

2 Элементы астрофотометрии

Астрофотометрия – наука об измерении количества энергии излучения, приходящего от небесного тела.

2.1 Освещенность

F – поток, E – освещенность. $E = \frac{F}{S}$, где S – площадь поверхности; $E \propto 1/r^2$.

Связь монохроматических освещенностей в шкалах длин волн и частот – $E_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} E_\nu$.

2.2 Звездные величины

Гиппарх (II век до н.э.) – 6 классов звезд (1 – ярчайшие, 6 – самые слабые, едва различимые глазом).

Определение звездных величин: $m = -2.5 \lg E + const$,

$$m_2 - m_1 = 2.5 \lg(E_1/E_2),$$

$$E_1/E_2 = 10^{0.4(m_2 - m_1)} = 100^{1/5(m_2 - m_1)} = 2.512^{(m_2 - m_1)}.$$

Особенности шкалы звездных величин – обратная, нелинейная.

3 Законы излучения

3.1 Интенсивность излучения

Интенсивность (I_ν) – количество энергии, проходящей через единичную площадку в пределах единичного телесного угла вокруг нормали к площадке в единичном интервале частот за единичное время: $I_\nu = \frac{dE_\nu}{d\sigma d\omega d\nu dt}$.

3.2 Оптическая толщина

$\tau = \ln \frac{F_0}{F}$, где F_0 – падающий на среду поток, F – поток после прохождения среды. Оптически тонкие и оптически толстые среды.

3.3 Тепловое излучение. Абсолютно черное тело.

Излучение нагретого тела. А. ч. т. – тело, полностью поглощающее все падающее на него излучение.

3.4 Закон Планка

Интенсивность излучения единицы поверхности абсолютно черного тела – универсальная функция частоты (длины волны) и температуры:

$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^{-1}$ и $B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1}$, где $k = 1.38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К – постоянная Больцмана.

3.5 Приближения Вина и Релея–Джинса

Приближение Вина: $B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$ ($\frac{h\nu}{kT} \gg 1$).

Формула Релея–Джинса: $B_\nu(T) = \frac{2k\nu^2}{c^2} T$ ($\frac{h\nu}{kT} \ll 1$).

3.6 Закон смещения Вина

Положение максимума Планковской кривой $\lambda_{max} \propto \frac{1}{T}$.

3.7 Закон Стефана–Больцмана

Мощность излучения абсолютно черного тела $\epsilon = \sigma T^4$, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-5}$ эрг/(см² · с · К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана.

3.8 Эффективная и яркостная температура

Эффективная температура (T_{eff}) – $\epsilon = \sigma T_{eff}^4$,

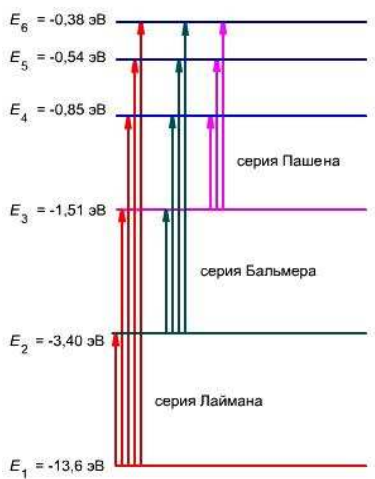
яркостная температура (T_B) – $I_\nu = B_\nu(T_B)$.

4 Элементы спектроскопии

4.1 Модель Бора атома водорода

$E_1 = -13.56$ эВ – энергия электрона в основном состоянии, $r_1 = 0.53 \cdot 10^{-8}$ см, $E_n = E_1/n^2$, $r_n = r_1 \cdot n^2$.

4.2 Элементарные процессы излучения и поглощения квантов



Связанно-связанные переходы; сериальные формулы для атома водорода, серии Лаймана, Бальмера, Пашена, Бреккета (рис. 9); линии $L\alpha$ и $H\alpha$; запрещенные переходы.

Ионизация (связанно-свободный переход), рекомбинация (свободно-связанный переход), свободно-свободный переход.

Рис. 9: Сери́и атома водорода

4.3 Виды спектров

Линейчатый (эмиссионный) спектр, непрерывный спектр, спектр поглощения (абсорбционный), условия формирования спектров разных видов.

4.4 Эффект Доплера

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$, где $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda_{em}$, v_r – радиальная скорость источника относительно наблюдателя.

Примеры: доплеровский профиль спектральной линии, лучевые скорости звезд и галактик, спектрально-двойные звезды.

5 Элементы молекулярной физики

5.1 Идеальный газ

Уравнение состояния, закон Максвелла (распределение частиц идеального газа по скоростям) – $n(v) \propto v^2 \cdot e^{-v^2/v_*^2}$, где $v_* = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ – наиболее вероятная скорость. Среднеквадратическая (средняя) скорость – $\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$.

5.2 Вырожденный газ и нейтронизованное вещество

Вырожденный газ – газ, свойства которого (например, давление) существенным образом определяются квантовым принципом тождественности частиц. Градиент давления вырожденного газа электронов уравнивает силу тяжести в белых карликах.

Нейтронизация – процесс перехода вещества звезд в нейтронное состояние на заключительных стадиях их эволюции.

Характерные плотности вырожденного газа и нейтронизованного вещества.

Гл. 7. Основные приборы астрофизики

1 Оптические телескопы

Рефракторы (Галилей, 1609), рефлекторы (Ньютон, 1668) – рис. 10, зеркально-линзовые телескопы.

Схема телескопа-рефрактора, хроматическая aberrация. Преимущества телескопов-рефлекторов: отсутствие хроматической aberrации, меньше потери света, проще изготовление (одна отражающая поверхность), проще разгрузка.

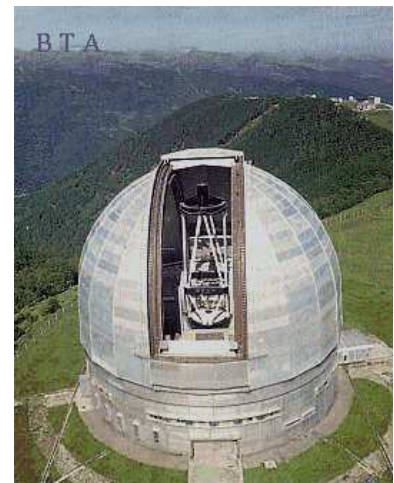


Рис. 10: Большой телескоп азимутальный (БТА) САО РАН

1.1 Системы телескопов-рефлекторов

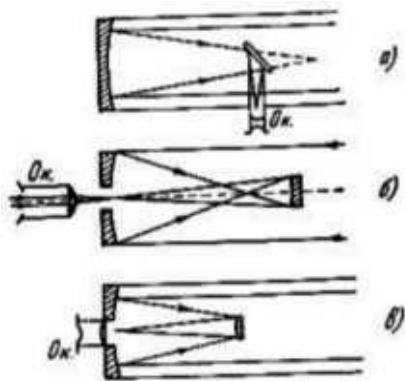


Рис. 11: Некоторые схемы телескопов-рефлекторов

Примеры нескольких систем (рис. 11):

(а) система Ньютона (плоское зеркало выводит фокус вбок);

(б) система Грегори (вогнутое зеркало, установленное за фокусом главного зеркала, удлиняет общее фокусное расстояние и выводит фокус в отверстие главного зеркала;

(в) система Кассегрена (выпуклое зеркало, установленное перед фокусом главного, удлиняет фокусное расстояние и выводит фокус через центральное отверстие в главном зеркале).

1.2 Основные характеристики оптических телескопов

Диаметр объектива (D), фокусное расстояние объектива (F), относительное отверстие (светосила) – D/F .

Функциональные характеристики – проникающая сила (оценка для визуальных наблюдений в телескоп), разрешающая способность ($\sim \frac{\lambda}{D}$), размер поля зрения телескопа.

2 Приемники оптического, ИК- и УФ-излучения

2.1 Характеристики приемника

Чувствительность, спектральная характеристика, порог чувствительности, шумы, световая характеристика, динамический диапазон.

2.2 Фотометры

Ф. – прибор для измерения освещенности (потока).

Глаз, фотоэмульсия, фотоэлектрические приемники, ПЗС-матрицы.

2.3 Спектрографы

Призменные и дифракционные спектрографы. Разрешающая сила и угловая дисперсия.

2.4 Поляриметры

П. – прибор для измерения поляризации излучения.

3 Радио, рентгеновские и гамма-телескопы

3.1 Радиотелескопы

Основные элементы – антенна, облучатель, приемник излучения. Диаграмма направленности, угловое разрешение (характерное значение – несколько угл. минут). Радиоинтерферометры.

Примеры – Аресибо (305 м), Effelsberg (100 м), VLA (рис. 12) и VLBI, РСДБ “Квазар”, РАТАН-600.



Рис. 12: Very Large Array (VLA) – радиоинтерферометр из 27 полноповоротных 25-м телескопов (США)

3.2 Рентгеновские и гамма-телескопы

Трубчатый коллиматор, телескопы косо́го падения. Сцинтилляционные и трековые детекторы.

4 Космические обсерватории

IUE (International Ultraviolet Explorer) – 45-см ультрафиолетовый телескоп (1978 г.),
IRAS (Infra Red Astronomical Satellite) – первый космический инфракрасный телескоп (диаметр – 57 см, год запуска – 1983),
HST (Hubble Space Telescope) – 2.4-м оптический телескоп (1990 г.) – рис. 13,
SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) – исследование Солнца и окосолнечного пространства (1995 г.),
Chandra – рентгеновская обсерватория (1999 г.),
GALEX (Galaxy Evolution Explorer) – ультрафиолетовая обсерватория (2003 г.) и др.

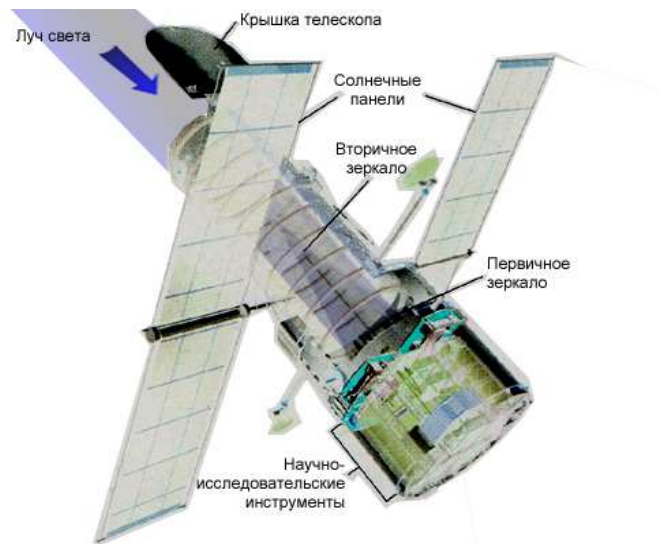


Рис. 13: Космический телескоп Хаббл (Hubble Space Telescope)

5 Приборы, регистрирующие излучение неэлектромагнитной природы

Детекторы космических лучей, нейтринные телескопы, детекторы гравитационных волн (LIGO, VIRGO).

Гл. 8. Физика Солнечной системы

1 Планеты

1.1 Общие сведения

Планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Основные различия: размеры и масса у планет-гигантов гораздо больше, чем у планет земной группы; плотности, наоборот, выше у планет земной группы; планеты-гиганты гораздо быстрее вращаются вокруг своих осей; у планет земной группы есть твердые поверхности, у планет-гигантов – нет; у планет-гигантов гораздо больше спутников и есть кольца; различие хим. состава – у планет земной группы больше содержание тяжелых элементов и пр.

Плутон – карликовая планета.

1.2 Планеты земной группы

Внутреннее строение, химический состав, поверхности планет, атмосферы, магнитное поле.

1.3 Планеты-гиганты

Внутреннее строение, химический состав, магнитное поле, излучение.

2 Малые тела Солнечной системы

Спутники планет и кольца, астероиды и объекты пояса Койпера, кометы, метеорное вещество.

3 Образование Солнечной системы

Образование вместе с Солнцем из протозвездного газопылевого облака 4.5–5 млрд. лет назад.

4 Внесолнечные планеты

Открытие – планета около пульсара (А. Вольщан, 1991), планета около нормальной звезды (51 Peg) – М. Майор, Д. Келос (1995).

Методы поиска – астрометрический (криволинейное движение звезды), гравитационное линзирование, затмения при прохождении планет, эффект Доплера. Статистика свойств известных планет.

Гл. 9. Солнце

1 Общие сведения

Радиус $R_{\odot} = 7 \cdot 10^{10}$ см, масса $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г, плотность $\rho_{\odot} = 1.4$ г/см³,
солнечная постоянная $Q = 1.36 \cdot 10^6$ эрг/(см² · с),
светимость $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с,
сидерический период вращения вблизи экватора $\sim 25^d$, около полюсов – $\sim 30^d$,
форма мало отличается от шара (сжатие $\sim 10^{-6}$),
угол между плоскостями солнечного экватора и эклиптики – $7^{\circ}15'$.

2 Спектр, температура и химический состав

Видимая область – спектр поглощения (фраунгоферовы линии); коротковолновая область ($\lambda \leq 2000$ Å) – непрерывный спектр слабеет, появляются эмиссионные линии; ИК-область – полосы молекулярного поглощения; радиодиапазон – большая интенсивность, переменность.

Эффективная температура – $T_{eff} = 5770$ К, по максимуму излучения (закон Вина) – 6750 К, яркостная температура зависит от длины волны ($\sim 10^6$ К на $\lambda = 1$ м).

Химический состав: Н – 70% (по массе), He – 28%, остальные элементы – не более 2%.

3 Основной источник энергии и внутреннее строение

Предложенные механизмы – метеорная гипотеза (Майер, 1848), контракционная гипотеза (сжатие Кельвина–Гельмгольца, 1854), радиоактивный распад (Джинс, 1926). Ядерные реакции – протон-протонный цикл, углеродный (CNO) цикл (Бете; Вейцеккер 1938–1939).

Внутреннее строение – зона ядерных реакций, лучистая зона, конвективная зона, атмосфера (фотосфера, хромосфера, корона).

4 Атмосфера

Фотосфера – основные характеристики, грануляция, солнечные пятна (рис. 14).

Хромосфера – характеристики, спикулы, хромосферная сетка, солнечные вспышки.

Корона – морфология, излучение в разных диапазонах, поляризация излучения, спектр (эмиссионные линии многократно ионизованных элементов – Fe XIV, Ni XVI и др.), температура – миллионы градусов. Протуберанцы.

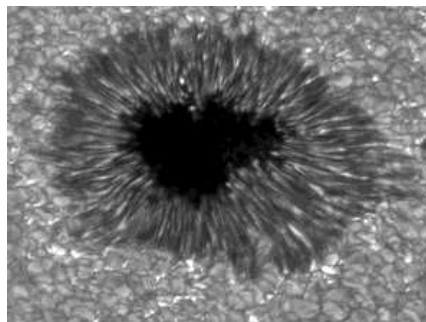


Рис. 14: Солнечное пятно и солнечная грануляция

5 Магнитное поле Солнца

Сложное по структуре и переменное. Пятна – тысячи эрстед, поверхность – ~ 1 Э, корона – $0.1-10$ Э.

6 Солнечная активность



Рис. 15: Изменение чисел Вольфа со временем

Изменение числа солнечных пятен (числа Вольфа – рис. 15), хромосферные вспышки, появление протуберанцов и пр. – проявления солнечной активности. Циклическость активности (11 лет). Влияние солнечной активности на Землю.

Гл. 10. Звезды

1 Общая характеристика звезд

Значение – химические “фабрики”, энергетические установки, вклад в массу Вселенной. Классификация звезд – нормальные звезды, белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры.

2 Основные параметры звезд

2.1 Массы

Определение масс звезд. Наблюдаемый разброс по массам – от $\sim 0.1 M_{\odot}$ до $\sim 100 M_{\odot}$. Интервал масс $\sim (0.01-0.1) M_{\odot}$ – коричневые карлики (осуществляются реакции $D \rightarrow {}^3\text{He}$). Причины существования ограничений звезд по массам.

2.2 Светимости и абсолютные звездные величины

Разброс по светимостям – от $\sim 10^{-6} L_{\odot}$ до $\sim 10^6 L_{\odot}$.

Измерение светимости в шкале звездных величин – понятие абсолютной звездной величины (видимая зв. величина объекта на расстоянии 10 пк.) Связь абсолютной (M) и видимой (m) звездных величин: $M = m - 5 \lg r + 5$, где r – расстояние до звезды в парсеках. Модуль расстояния: $m - M = 5(\lg r - 1)$ – расстояние, выраженное в шкале звездных величин.

Светимость звезды в светимостях Солнца: $L/L_{\odot} = 10^{0.4(M_{\odot} - M)}$.

2.3 Радиусы

Прямые методы – звездные интерферометры, метод спекл-интерферометрии. Косвенный метод – использование закона Стефана–Больцмана: $L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$, где R – радиус звезды.

Разброс звезд по радиусам – от $\sim (10^{-2} - 10^{-3}) R_{\odot}$ до $\sim (10^2 - 10^3) R_{\odot}$ (по T_{eff} – от ~ 2500 К до ~ 50000 К).

2.4 Химический состав

Химический состав звезд в целом близок к солнечному. Два типа звездного населения.

3 Спектральная классификация звезд

3.1 Гарвардская классификация

Спектральные классы O–B–A–F–G–K–M – последовательность изменения T_{eff} звезд. Основные особенности звезд разных спектральных классов:

O – линии поглощения He^+ , He, H, ионизованных C, Si, N, O; $T_{eff} = 40 - 30$ тыс. К

B – сильные линии нейтрального He; $T_{eff} = 30 - 10$ тыс. К

A – сильные линии H; $T_{eff} = 10 - 7$ тыс. К

F – линии H слабеют, усиливаются линии металлов; $T_{eff} = 7 - 6$ тыс. К

G – интенсивны линии металлов Ca^+ , Fe, Ti и др.; $T_{eff} = 6 - 5$ тыс. К

K – линии металлов, появляются молекулярные полосы; $T_{eff} = 5 - 3.5$ тыс. К

M – сильные полосы поглощения молекулярных соединений; $T_{eff} = 3.5 - 2.5$ тыс. К

3.2 Показатели цвета

Показатель цвета – разность видимых звездных величин объекта в разных цветовых полосах, мера T_{eff} . Примеры стандартных широкополосных фотометрических систем – U, B, V и пр.

3.3 Классы светимости

Спектры звезд зависят не только от T_{eff} , но и от светимости. Классы светимости: I – сверхгиганты, II – яркие гиганты, III – гиганты, IV – субгиганты, V – карлики (главная последовательность), VI – субкарлики, VII – белые карлики (рис. 16).

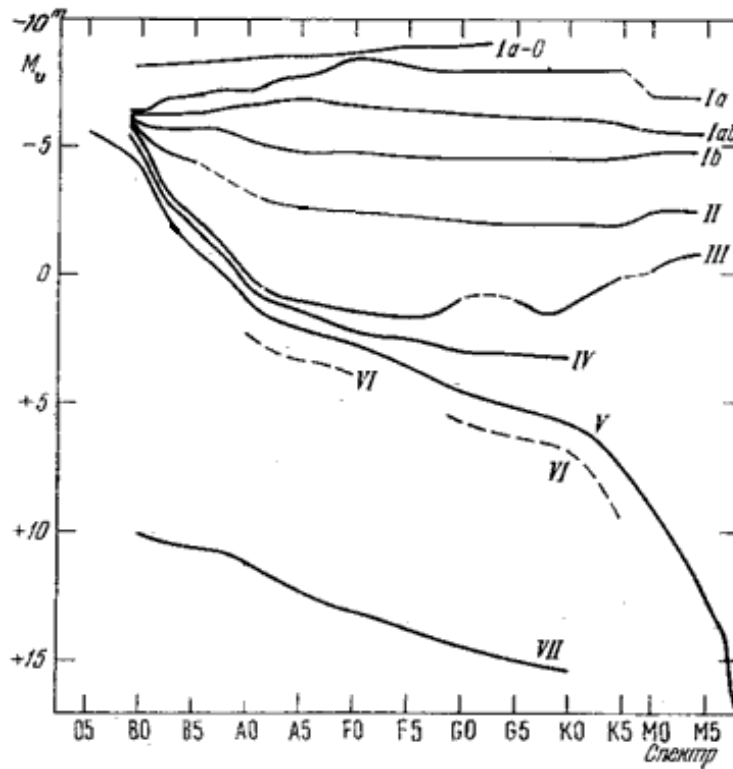


Рис. 16: Классы светимости звезд

Итоговая классификация звезд двумерная: спектральный класс (T_{eff} , показатель цвета) – светимость. Солнце – G2V.

4 Диаграмма Герцшпрунга–Рассела

M (или L) – спектральный класс (или T_{eff} , показатель цвета) (рис. 17).

5 Строение звезд

5.1 Уравнение гидростатического равновесия

Вывод уравнения гидростатического равновесия (сферически-симметричная звезда, находящаяся в равновесии под влиянием сил газового давления и гравитации) – $\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(\leq r)}{r^2}\rho$, где P – давление, ρ – плотность, $M(\leq r)$ – масса звезды в пределах расстояния r от центра.

Дополнительные уравнения – $\frac{dM(\leq r)}{dr} = 4\pi r^2\rho$, уравнение состояния, кинетики ядерных реакций и пр. Система таких уравнений определяет модель внутреннего строения звезды.

5.2 Оценка физических условий в недрах звезд

Приближенные оценки давления и температуры в звездах на основе уравнения гидростатического равновесия и теоремы о вириале.

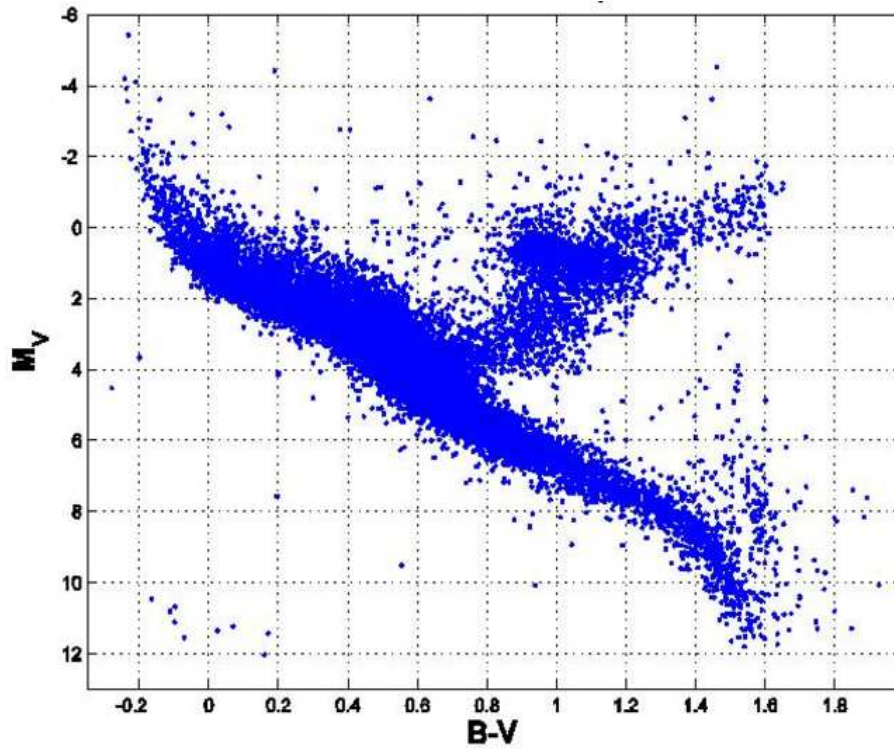


Рис. 17: Диаграмма Герцшпрунга–Рассела для звезд каталога HIPPARCOS

5.3 Шкалы времен звездной эволюции

Динамическое время – время, за которое звезда сожмется при отсутствии газового давления.

$t_{dyn} \approx \sqrt{\frac{R^3}{GM}}$, для Солнца $t_{dyn} \approx 30$ мин.

Тепловое время (время Кельвина–Гельмгольца) – время, в течение которого звезда может сохранять свою светимость за счет запаса тепловой энергии при медленном сжатии: $t_{KH} \approx \frac{GM^2}{RL}$ (~ 30 млн. лет для Солнца).

Ядерное время – время, в течение которого звезда может сохранять свою светимость за счет термоядерных реакций превращения водорода в гелий: $t_n \approx \frac{0.01Mc^2}{L}$ ($\sim 10^{11}$ лет).

6 Источники энергии звезд

Водородный (протон–протонный) и углеродный (CNO) циклы.

Сокращенная запись (на самом деле – цепочка реакций): $4\frac{1}{2}\text{H} \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\gamma + 2\nu$, где γ – гамма-квант, ν – нейтрино.

Удельное энерговыделение протон–протонного цикла $\propto T^4$, CNO-цикла $\propto T^{20}$.

7 Эволюция звезд

7.1 Начало звездообразования

Гравитационная неустойчивость газопылевого облака, вывод критерия Джинса: $M_J > \left(\frac{k}{G}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{m_p^2} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}}$, где m_p – масса протона, T , n – температура межзвездного облака и концентрация частиц в нем.

При $T=20\text{ К}$, $n=1\text{ см}^{-3}$ $M_J \sim 10^3 M_\odot$, $R_J \sim 10 - 100\text{ пк}$.

Факторы, препятствующие гравитационному сжатию, – вращение, магнитное поле и пр. Факторы, стимулирующие начало звездообразования, – ударные волны (вспышки сверхновых), столкновения облаков.

Каскадная фрагментация, массовое звездообразование.

7.2 Протозвезды

7.3 Стадия ГП

Время пребывания звезд разной массы на ГП $\sim 10^{10} (\frac{M}{M_\odot})^{-2}$ лет.

7.4 Уход с ГП

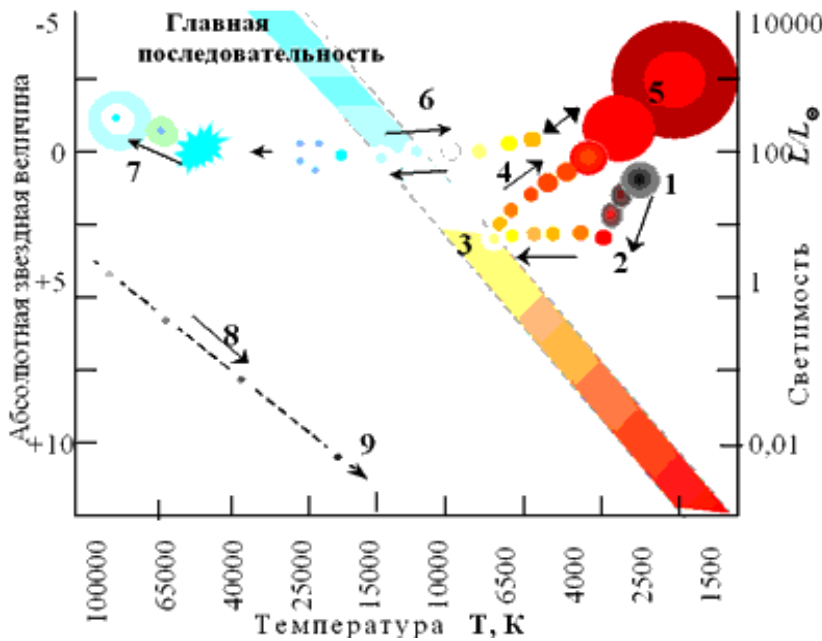


Рис. 18: 1 – гравитационное сжатие протозвездного облака; 2 – протозвезда; 3 – стадия главной последовательности; 4 – образование гелиевого ядра, уход в область гигантов и сверхгигантов; 5 – красный сверхгигант; 6 – пульсирующая переменная, формирование углеродного ядра; 7 – вспышка новой, образование планетарной туманности; 8, 9 – остывающий белый карлик.

Рис. 18: Схема эволюции звезды с массой, равной массе Солнца

7.5 Конечные стадии эволюции

В зависимости от массы звезды в результате ее эволюции может получиться белый карлик (масса звезды $\sim M_\odot$), нейтронная звезда ($\sim (2 - 3)M_\odot$), черная дыра ($\geq (2 - 3)M_\odot$).

Белый карлик – компактный (радиус $\sim R_\oplus$) объект с массой $\sim M_\odot$, плотностью $\sim 10^6\text{ г/см}^3$ и температурой $\sim (5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4)\text{ К}$. Давление обусловлено вырожденным электронным газом. Предельная масса белого карлика $\sim 1.46 M_\odot$ (предел Чандрасекара).

Нейтронные звезды имеют плотности $\sim 10^{13} - 10^{15}\text{ г/см}^3$, размеры $\sim 10\text{ км}$ и состоят в основном из нейтронизованного вещества.

Черная дыра – область пространства, в которой параболическая скорость превышает скорость света. Образуется, когда радиус объекта массы M становится меньше величины $r_g = \frac{2GM}{c^2}$ (гравитационный радиус, радиус Шварцшильда).

Статистика остатков звездной эволюции, поиск кандидатов в черные дыры среди двойных звездных систем.

Гл. 11. Двойные и переменные звезды

1 Двойные звезды

Значение – их много ($\sim 50\%$ звезд в Галактике); дают единственный прямой способ оценки масс звезд; связаны общим происхождением и являются важным тестом проверки теорий звездной эволюции.

1.1 Визуально-двойные

Компоненты достаточно далеки друг от друга и видны отдельно.

1.2 Затменные двойные

Двойственность обнаруживается по взаимным затмениям компонент, в результате которых меняется блеск системы. Типичная кривая блеска затменной двойной.

1.3 Спектрально-двойные

Двойственность обнаруживается по периодическому доплеровскому смещению спектральных линий из-за орбитального движения звезд.

1.4 Тесные двойные системы

Расстояние между компонентами сравнимо с их размерами, существенную роль играют приливные взаимодействия компонент.

2 Пульсирующие переменные

2.1 Цефеиды

Периодические изменения блеска с типичной амплитудой $0.^m1 - 2^m$ и периодом от нескольких часов до полугода. Гиганты и сверхгиганты классов F и G, в которых происходят периодические пульсации (по спектрам видно периодическое изменение лучевых скоростей).

Объяснение существования радиальных пульсаций (С. Жевакин, 1950-е годы) – клапанный механизм, основанный на изменении физических условий (состояния ионизации, прозрачности) в слое частично ионизованного гелия.

Особое внимание к цефеидам привлечено из-за существования четкой зависимости между периодом пульсаций и их светимостью. (Приближенная зависимость имеет следующий вид: $M_V = -1^m - 3lg P$, где M_V – средняя абсолютная звездная величина в фильтре V, а P – период пульсаций)

в сутках.) Это дает возможность оценки расстояний до ближайших галактик – цефеиды можно наблюдать в галактиках вплоть до расстояний 20–30 Мпк.

2.2 Другие типы пульсирующих переменных

Звезды типа RR Lyr (короткопериодические (период $\leq 1^d$) цефеиды, А, F гиганты), W Vir (цефеиды сферической составляющей), RV Tau (сверхгиганты F, G, K классов, неустойчивая кривая блеска, периоды от 30 до 150 дней, амплитуда $\sim 1^m - 2^m$), β Cep (O, B гиганты с быстрыми (несколько часов) небольшими (десятые зв. вел.) колебаниями блеска), μ Cep (красные – гиганты и сверхгиганты класса M – полуправильные переменные), мириды (долгопериодические переменные, Me сверхгиганты, периоды – месяцы-годы, амплитуда $\sim 3^m - 7^m$) и др.

2.3 Эволюционный статус пульсирующих переменных

Пульсирующие переменные – гиганты и сверхгиганты поздних спектральных классов, находящиеся на поздних стадиях эволюции (после ухода с главной последовательности).

3 Эруптивные переменные

3.1 Молодые звезды

T Tau (карлики Fe – Me типов, быстрые (часы) хаотические колебания блеска с амплитудой до 3^m), UV Cet (карлики Ke – Me типов, рост светимости в десятки раз за время ~ 1 мин. с последующим медленным (полчаса-час) возвращением к исходному уровню), фуоры (рост светимости в десятки-сотни раз за месяцы-годы) и др. Молодые объекты на поздних стадиях кельвиновского сжатия, на стадии до главной последовательности.

3.2 Новые звезды

Быстрый (дни) рост светимости на $\sim 7^m - 13^m$. Средняя абсолютная звездная величина в максимуме блеска $\sim -8.^m5$. В максимуме блеска по спектрам новые похожи на сверхгиганты А–F классов, после вспышки выглядят горячими карликами. Полное энерговыделение $\sim 10^{45} - 10^{46}$ эрг. Вид кривой блеска, изменения спектра, статистика вспышек.

Причина вспышек – обмен веществом в тесной двойной системе, один из компонентов которой – белый карлик (термоядерный взрыв богатого водородом вещества на поверхности белого карлика). Повторные новые, звезды типа U Gem.

3.3 Сверхновые звезды

Быстрой рост светимости на 9–10 порядков, абсолютная зв. вел. в максимуме от $\sim -14^m$ до $\sim -21^m$.

Энергия вспышки $\sim 10^{50}$ эрг. Классификация сверхновых по виду кривых блеска и по спектрам: SN I демонстрируют очень сходные кривые блеска с максимумом $\approx -20^m$, в спектре видны широкие линии поглощения Ca, Mg, Fe, Si и др., но нет линий H и He (SN Ia и SN Ib); SN II имеют, в среднем, меньшую светимость, сильно различающиеся кривые блеска, в спектре есть линии H и He.

Службы поиска сверхновых, статистика вспышек в нашей и в других галактиках, остатки вспышек сверхновых.

Возможные причины вспышек – аккрецирующий белый карлик в тесной двойной системе (SN Ia), конец эволюции молодых массивных звезд типа Вольфа–Райе (SN Ib), конец эволюции звезд с массой $> 8 M_{\odot}$ (SN II).

В настоящее время SN Ia рассматриваются как “стандартные свечи” для определений расстояний на космологических масштабах, так как разброс значений абсол. зв. вел. в максимуме блеска у них составляет лишь несколько десятых зв. вел. (рис. 19). Наблюдения кривых блеска далеких SN Ia привели к открытию ускоренного расширения Вселенной.

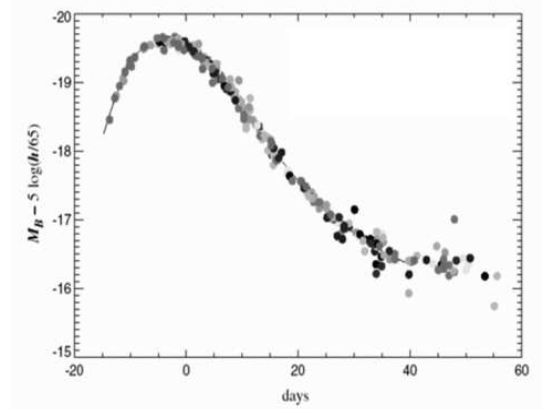


Рис. 19: Усредненная кривая блеска SN Ia

4 Пульсары и рентгеновские источники

Пульсары – источники импульсного радиоизлучения с очень большой стабильностью периода. Периоды известных пульсаров – от 0.0015 сек. до нескольких сек., массы $\sim 1 M_{\odot}$. Оценки плотностей и размеров пульсаров по их периодам. Сверхсильные магнитные поля ($\sim 10^{12}$ Гс), огромная яркостная температура радиоизлучения, сильная поляризация. Торможение пульсаров, их возраст.

Пульсары – вращающиеся нейтронные звезды, их излучение генерируется релятивистскими электронами в магнитном поле нейтронной звезды и сосредоточено в узких конусах вблизи магнитных полюсов звезды (рис. 20).

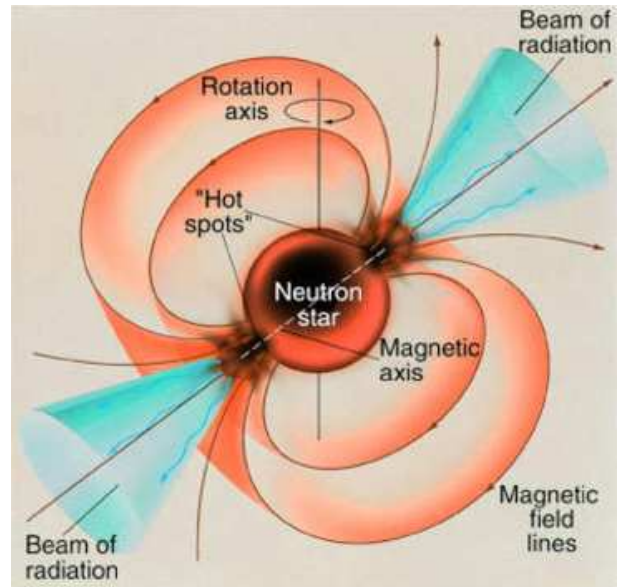


Рис. 20: Схема строения пульсара

Пульсары, входящие в состав двойных систем, позволяют тестировать предсказания ОТО (достигнутая в настоящее время точность проверки релятивистских эффектов составляет $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$). Наблюдения двойного пульсара PSR 1913+16 дали косвенное свидетельство существования гравитационных волн.

Рентгеновские пульсары, барстеры, новоподобные источники.

Гл. 12. Галактика

Открытие Галактики – Г. Галилей, Т. Райт и И. Кант, В. Гершель, Я. Каптейн, Х. Шепли.

1 Классические методы звездной астрономии

1.1 Угловое распределение объектов

Метод звездных подсчетов в площадках.

1.2 Определение расстояний

Методы:

тригонометрические параллаксы (точность $\approx 0.''01$ при наземных наблюдениях и $\approx 0.''001$ при космических);

спектральные параллаксы: оценка светимости звезды по ее спектру, видимая зв. величина известна \rightarrow оценка расстояния;

динамические параллаксы: массы компонентов двойной считаются известными, период обращения и угловое расстояние между компонентами известны \rightarrow расстояние;

средние (статистические) параллаксы: чем дальше звезда, тем меньше собственное движение (грубая оценка расстояния);

групповые параллаксы: наблюдается скопление звезд с одинаковой пространственной скоростью, собственные движения звезд (μ) сходятся в одной точке – радианте скопления, тогда расстояние в парсеках $r = \frac{v_r \operatorname{tg} q}{4.74 \mu}$, где v_r – радиальная составляющая скорости звезды (км/с), q – угол между направлением на звезду и радиантом скопления, μ – собственное движение звезды ($''/\text{год}$). Усреднение оценок расстояния по индивидуальным звездам позволяет оценить расстояние до скопления с точностью $\approx (1 - 2)\%$.

1.3 Определение скоростей

Доплеровское смещение, собственное движение \rightarrow пространственная скорость звезды. Наблюдения в радиодиапазоне (HI).

1.4 Подсчеты звезд

Интегральные и дифференциальные звездные подсчеты. Теорема Зеелигера.

1.5 Функция светимости звезд

Функция светимости – число звезд данной светимости в единице объема, вид функции светимости. Плотность звезд в окрестности Солнца – 0.12 пк^{-3} . Ближайшие соседи Солнца (звезды с $M_V \leq 15^m$ и $r \leq 10 \text{ пк}$): 8 белых карликов, 2 субгиганта, 245 звезд главной последовательности.

2 Строение Галактики

2.1 Основные подсистемы Галактики



Рис. 21: Изображение центральной части Млечного Пути со спутника СОВЕ (ИК диапазон). Хорошо видны звездный диск (“с ребра”), центральное “вздутие” – балдж и содержащая поглощающую среду плоская составляющая

Основные характеристики Галактики в целом: абсолютная звездная величина $M_B \approx -20.^m5$; морфологический тип SBbc (с баром); диаметр звездного диска ≈ 30 кпк; масса $\sim 10^{11} M_\odot$ (в пределах границ звездного диска); максимальная скорость вращения $\approx 200\text{--}220$ км/с; отношение светимостей балджа и диска $\sim 1/4$; относительное содержание газа $\sim 5\%$ (по массе); содержание пыли примерно в сто раз меньше, чем содержание газа; магнитное поле $\sim 10^{-6}$ Гс; расстояние от Солнца до центра Галактики – 8 кпк.

Звездный диск: радиус ≈ 15 кпк; радиальное распределение плотности $\propto e^{-r/h_r}$, где $h_r \approx 3$ кпк; вертикальный масштаб распределения плотности $h_z \approx 0.3$ кпк.

Самые молодые объекты (звезды классов O и B, цефеиды, SN II, звездные ассоциации, рассеянные скопления, газ и пыль) образуют *плоскую составляющую* (толщина $\sim 100 - 200$ пк) внутри звездного диска.

Балдж: характерный размер $\sim 1\text{--}2$ кпк, сплюснутость ~ 0.6 . В пределах 150 пк от центра – плотное звездное скопление, в самом центре – компактный объект массой $\sim 3 \cdot 10^6 M_\odot$ (черная дыра?).

Объекты *гало* (сферической составляющей) концентрируются не к плоскости Галактики, а к ее центру (пространственная плотность $\propto r^{3-3.5}$). Гало состоит из шаровых скоплений, субкарликов, звезд типа RR Lyr, W Vir и тянется до расстояний $r \geq 50 - 100$ кпк.

Подсистемы отличаются химическим составом, возрастом и кинематическими характеристиками: переход от объектов диска к гало сопровождается уменьшением металличности (содержания тяжелых элементов), увеличением возраста и усилением случайных движений. Объекты гало двигаются преимущественно по сильно вытянутым хаотически ориентированным орбитам. Звездные населения первого и второго типов.

2.2 Вращение и масса

Вращение Галактики изучается по измерениям лучевых скоростей звезд и по доплеровскому смещению и профилю линии HI в радиодиапазоне.

Вращение происходит по часовой стрелке, если смотреть стороны северного полюса Галактики.

Вращение нетвердотельно – угловая скорость убывает при удалении от центра (за исключением центральной области).

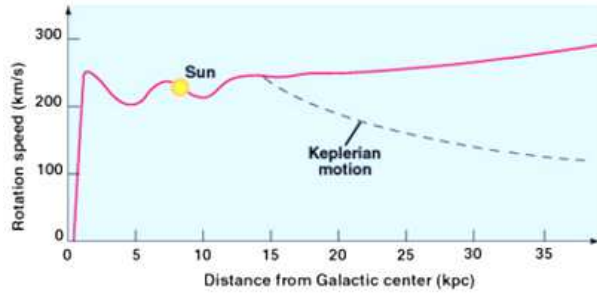


Рис. 22: Кривая вращения Галактики

Линейная скорость сначала растет, затем остается почти постоянной (рис. 22).

Зная скорость вращения на данном расстоянии от центра Галактики (V_{rot}), можно оценить ее массу. Предположение о сферическом распределении вещества позволяет получить разумную верхнюю оценку массы по простой формуле $M(\leq r) = \frac{V_{rot}^2 r}{G}$. Оценка массы зависит от расстояния, в пределах которого она ищется.

2.3 Скрытая масса в Галактике

Свидетельства существования скрытой массы: внешние области (за пределами звездного диска) кривой вращения Галактики не показывают кеплеровского убывания значений V_{rot} (рис. 22); большая скорость убегания звезд в окрестности Солнца (~ 500 км/с) – Галактика простирается по крайней мере до $r=40$ кпк и имеет массу $\sim 5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$; динамика шаровых скоплений и карликовых спутников и пр. Млечный Путь погружен в протяженное и массивное темное гало. В пределах звездного диска вклады видимого вещества и темного гало сопоставимы.

2.4 Спиральная структура

Спиральная структура определяется неуверенно – диск Галактики виден “с ребра”, на просвет. Один из вариантов спиральной структуры показан на рис. 23. В области спиральных ветвей находятся наиболее массивные концентрации газа и молодых звезд.

Упорядоченный крупномасштабный спиральный узор – волна плотности, распространяющаяся в звездной и газовой подсистемах диска. Флоккулентный спиральный узор – области звездообразования, растянутые дифференциальным вращением диска.

3 Звездные скопления

Звездные ассоциации – обширные (50–100 пк), относительно немногочисленные группировки молодых звезд (десятки звезд, возраст $\leq 10^8$ лет). ОВ-ассоциации, ассоциации звезд типа Т Тау.

Рассеянные скопления – гравитационно-связанные группировки сотен и тысяч звезд, возраст $\sim 10^8 - 10^9$ лет, линейные размеры 2–20 пк (примеры – Плеяды, Гиады).

Шаровые звездные скопления – гравитационно-связанные группировки из $10^4 - 10^6$ звезд, типичные размеры – 20–30 пк, самые старые объекты Галактики (возраст $\approx 10^{10}$ лет). Низкая металличность звезд шаровых скоплений. В Галактике известно около 150 шаровых скоплений.

Диаграммы Герцшпрунга–Рассела для рассеянных и шаровых скоплений. Оценка возраста скоплений по диаграмме Г–Р.

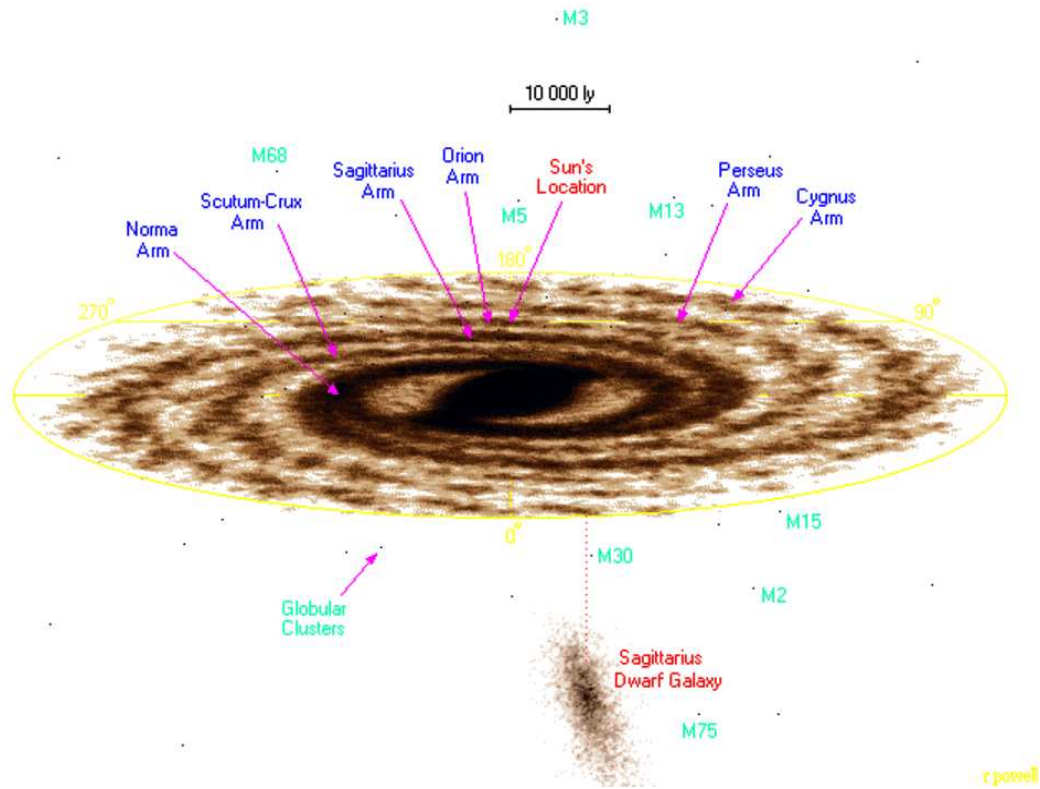


Рис. 23: Схема, иллюстрирующая крупномасштабное строение Галактики

4 Межзвездная среда

4.1 Газ

Межзвездный газ – многокомпонентная, многофазная среда. Основные компоненты: диффузные облака HI ($T \approx 80$ К, $n \approx 10$ см $^{-3}$), межоблачная среда ($T \approx 10^4$ К, $n \approx 0.1$ см $^{-3}$), области HII и газовые туманности ($T \approx 10^4$ К, $n \approx 30$ см $^{-3}$), гигантские молекулярные облака ($T \approx 20$ К, $n \approx 300$ см $^{-3}$, масса $\sim 3 \cdot 10^5 M_{\odot}$, размер ~ 20 пк), коронарный газ ($T \approx 5 \cdot 10^5$ К, $n \approx 3 \cdot 10^{-3}$ см $^{-3}$). В оптике и радио обнаружены более сотни межзвездных молекулярных соединений – H $_2$, CO, OH, H $_2$ O, H $_2$ CO и пр.

Распределение HI: депрессия при $r \leq 4$ кпк, плато до $r \approx 16$ кпк и последующее уменьшение плотности. Диск HI прослеживается далеко за границей звездного диска. Распределение H $_2$: широкое кольцо на $r \approx 5$ кпк.

Масса HI в Галактике $\sim 4 \cdot 10^9 M_{\odot}$, масса H $_2 \sim 10^9 M_{\odot}$.

4.2 Пыль и межзвездное поглощение света

Характерный размер пылинок 0.1–1 мкм. Тугоплавкое ядро и оболочка из летучих элементов. Образование пылинок – холодные (500–2000 К) атмосферы гигантов и сверхгигантов поздних спектральных классов, оболочки новых, сверхновых. Пыль распределена неоднородно с концентрацией $\sim 10^{-11}$ см $^{-3}$. В диапазоне λ от 0.4 до 5 мкм удельное поглощение $A_{\lambda} \propto \lambda^{-1.85}$.

Количественная характеристика поглощения – избыток цвета:

$E_{B-V} = A_B - A_V = (B - B_0) - (V - V_0) = (B - V) - (B_0 - V_0)$, где B, V – наблюдаемые зв. вел. звезды в фильтрах B и V , а B_0, V_0 – не искаженные поглощением величины.

Связь поглощения и избытка цвета: $R_V = \frac{A_V}{E_{B-V}} \approx 3.2$, $R_B = R_V + 1$. В окрестности Солнца в плоскости Галактики $E_{B-V} \approx 0.^m6/\text{кпк}$, $A_V = R_V E_{B-V} \approx 1.^m9/\text{кпк}$.

Поглощение зависит от галактической широты $A_V \propto \frac{1}{|\sin b|}$, в направлении на полюс Галактики полное поглощение $A_V \approx 0.^m15$.

Гл. 13. Галактики

В. Гершель, В. Парсонс (лорд Росс), Э. Хаббл.

1 Общие сведения

Названия галактик, каталоги галактик (M, NGC, Zw, UGC и пр.), базы данных (NED, LEDA). Обзоры галактик – Паломарский обзор (DSS), 2MASS, 2dF, SDSS. Доступны фотометрические и спектральные данные для миллионов галактик.

Основные характеристики (методы их определения):

типичные размеры 1 – 100 кпк (центральные галактики скоплений – вплоть до ~ 1 Мпк);

светимости $\sim 10^7 - 10^{12} L_{\odot}$; массы $\sim 10^7 - 10^{12} M_{\odot}$;

максимальные скорости вращения $V_{max} \approx 50 - 350$ км/с;

показатели цвета $B - V \approx +0.4 \div +1$;

относительная масса газа – до $\sim 30\%$ (в пределах звездного диска);

пространственная плотность ярких галактик $\sim 10^{-2} \text{ Мпк}^{-3}$;

распределение галактик по светимостям (функция светимости) – $\phi(L) \propto \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \cdot e^{-\frac{L}{L_*}}$,

где $\alpha \approx -1$, а $L_* \approx 2 \cdot 10^{10} L_{\odot, B}$.

2 Классификация и структура галактик

2.1 Хаббловская классификация

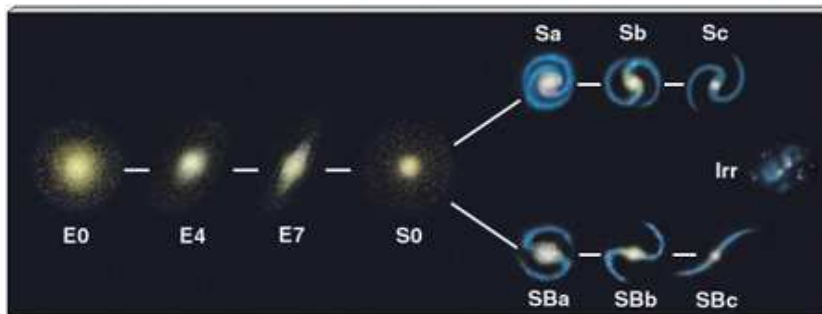


Рис. 24: Хаббловская классификация галактик

Хаббл (1925, 1936): морфологическая классификация галактик (рис. 24). Основные критерии – относительный размер и яркость балджа, степень раскрытия и клочковатость (структурность) спиральных ветвей.

Два главных типа галактик: E – эллиптические (числовой индекс справа характеризует видимое сжатие галактики и он равен $10(1 - \frac{b}{a})$, эллиптическая галактика с

видимым сжатием $\frac{b}{a} = 0.7$ обозначается как E3), S – спиральные (буква B означает наличие бара, бар встречается почти у половины всех спиральных галактик). Тип S0 – пререходный между E и S галактиками, Irr – неправильные галактики.

Относительная частота встречаемости галактик разных типов $\approx 25 : 70 : 5$ для E+SO, S и Irr галактик соответственно.

2.2 Свойства галактик разных типов

E галактики: старые звезды; почти нет межзвездного газа; очень медленное вращение; форма определяется анизотропией дисперсии скоростей звезд; распределение поверхностной яркости описывается законом Вокулера $I(r) = I_e \cdot 10^{-3.33[(r/r_e)^{\frac{1}{4}} - 1]}$ или более общим законом Серсика $I(r) \propto e^{-(r/r_e)^{\frac{1}{n}}}$ (I_e и r_e – так называемые эффективная поверхностная яркость и эффективный радиус). Между фотометрическими (r_e и L (или I_e)) и кинематическими (σ – спроецированная на луч зрения дисперсия скоростей звезд) характеристиками галактик существует трехпараметрическая зависимость, называемая фундаментальной плоскостью. Проекция фундаментальной плоскости: соотношение Корменди (плоскость $I_e - r_e$), соотношение Фабера–Джексона ($L \propto \sigma^{3-4}$). Возможное объяснение существования фундаментальной плоскости – теорема о вириале + зависимость отношения масса–светимость от массы галактик.

S галактики: переход от галактик типа Sa к галактикам типа Sc и далее сопровождается уменьшением светимости балджа, увеличением угла закрутки спиральных ветвей, уменьшением показателей цвета (поголубением), увеличением массы межзвездного газа и усилением темпа звездообразования, уменьшением относительной толщины звездных дисков; галактики быстро вращаются. Сглаженное распределение яркости звездного диска описывается экспоненциальным законом $I(r) \propto e^{-r/h_r}$. Светимость и максимальная скорость вращения спиральной галактики связаны эмпирическим соотношением Талли–Фишера: $L \propto V_{max}^{3-4}$.

3 Шкала расстояний во Вселенной

Основные методы оценки расстояний суммированы на рис. 25 (горизонтальные отрезки демонстрируют диапазон расстояний, в пределах которого работают соответствующие методы): 1 – тригонометрический параллакс, 2 – групповой параллакс, 3 – статистический параллакс, 4 – метод совмещения главных последовательностей (скопления звезд), 5 – оценка радиусов звезд (метод Бааде–Весселинка), 6 – звезды типа RR Lyr, 7 – VLBI наблюдения собственных движений мазеров в нашей и других галактиках, 8 – цефеиды, 9 – функция светимости планетарных туманностей, 10 – новые, 11 – метод флуктуаций поверхностной яркости, 12 – функция светимости шаровых скоплений, 13 – метод Бааде–Весселинка для SN, 14 – соотношение Талли–Фишера для спиральных галактик, 15 – соотношение Фабера–Джексона и фундаментальная плоскость для эллиптических галактик, 16 – SN Ia, 17 – эффект Сюняева–Зельдовича для скоплений галактик, 18 – гравитационное линзирование. Закон Хаббла.

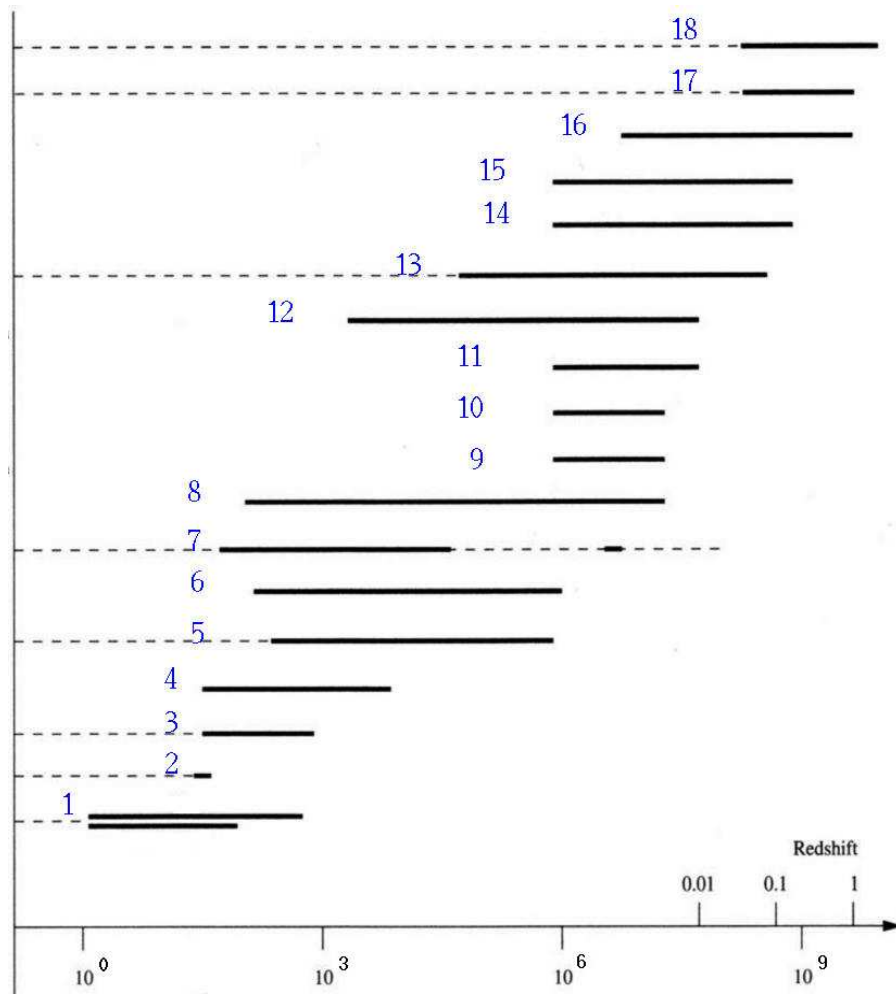


Рис. 25: Шкала расстояний. Вдоль горизонтальной оси отложены красные смещения (вверху) и расстояния в парсеках (внизу)

4 Пространственное распределение

Масштабы $\sim 1-10$ Мпк – сильно неоднородное распределение галактик, ≥ 100 Мпк – переход к однородному распределению (рис. 26). Описание тенденции галактик к скучиванию – двухточечная корреляционная функция: $\xi(r) \propto (\frac{r}{r_0})^{-\gamma}$, $r_0 \approx 5$ Мпк, $\gamma \approx 1.8$ ($r \leq 50$ Мпк).

Системы галактик:

- *Двойные галактики* (около 10% всех галактик).
- *Взаимодействующие галактики* ($\sim 5\%$ галактик) – системы из двух и более объектов, находящиеся на расстояниях, сравнимых с их размерами, и демонстрирующих признаки взаимодействия – приливные хвосты и перемычки, искажения структуры, внешние оболочки и т.п. Мержеры (сливающиеся галактики). Численное моделирование взаимодействия галактик. Э. Хольмберг (1941), А. и Ю. Тумре (1972).
- *Группы галактик* – гравитационно-связанные группировки, содержащие как правило $\sim 10^1$

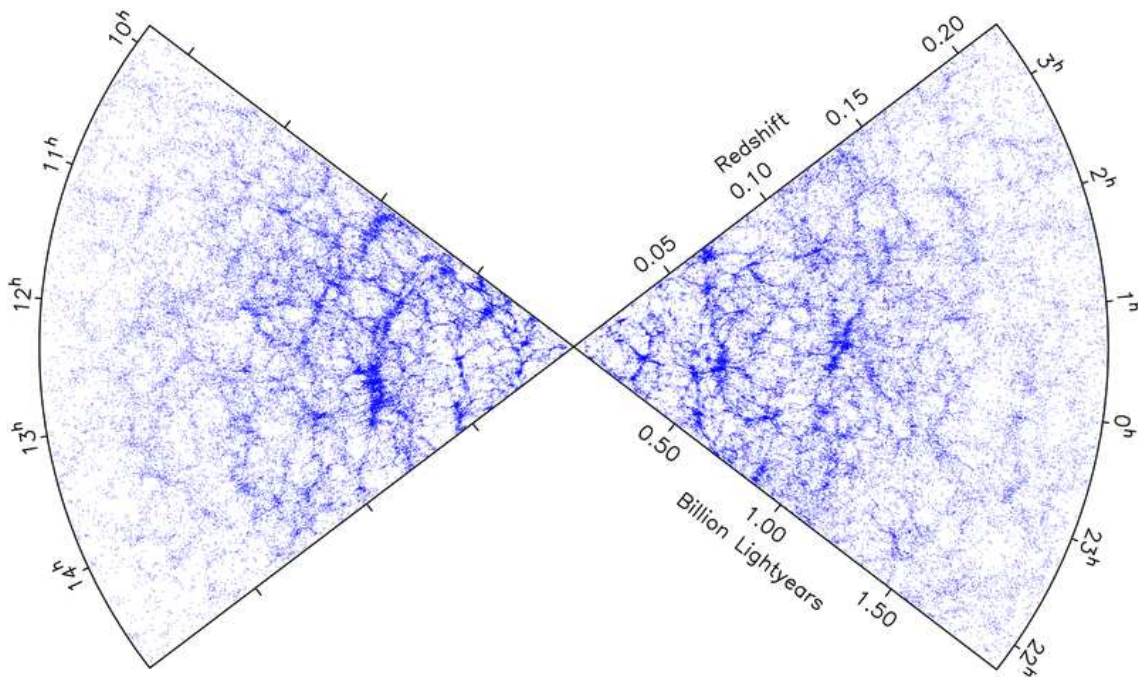


Рис. 26: Радиальное распределение галактик в области обзора 2dF

галактик. Компактные группы.

- *Скопления галактик* – самые крупные гравитационно-связанные системы Вселенной, содержащие $\sim 10^2 - 10^4$ галактик, характерный размер – несколько Мпк. Иррегулярные и регулярные скопления, сD галактики, соотношение морфология–плотность для скоплений, газ в скоплениях (масса сравнима с суммарной массой галактик скопления, $T \sim 10^{7-8}$ К) – рис. 27.

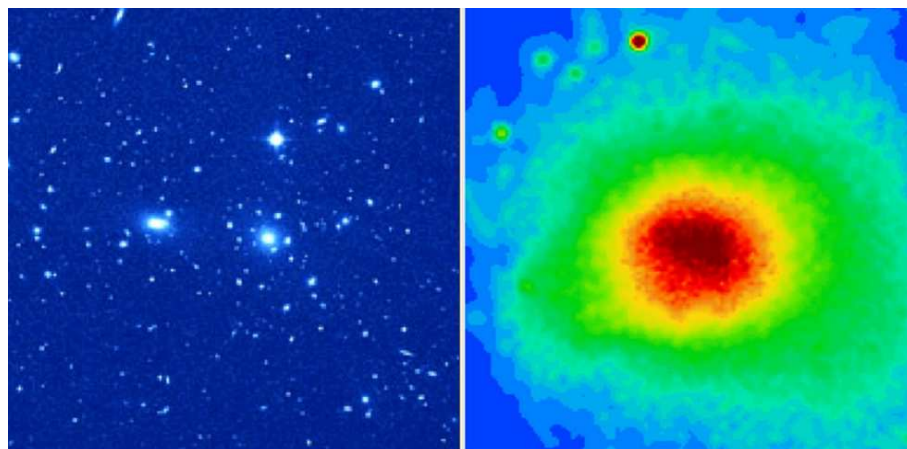


Рис. 27: Оптическое (слева) и рентгеновское (справа) изображения скопления галактик Сомы

- *Сверхскопления галактик* – области повышенной плотности галактик и скоплений галактик, не связаны гравитацией в устойчивые объекты.

Пустоты (“войды”).

5 Галактики с активными ядрами

5.1 Классификация

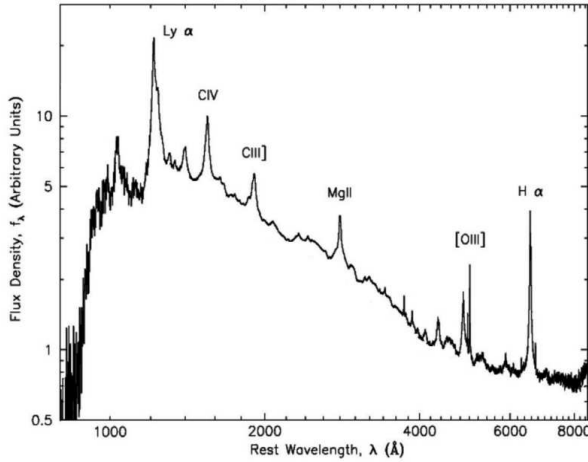


Рис. 28: Составной спектр квазара представляют собой ядра гигантских спиральных галактик ранних типов и эллиптических галактик, подстилающие галактики часто демонстрируют признаки взаимодействия.

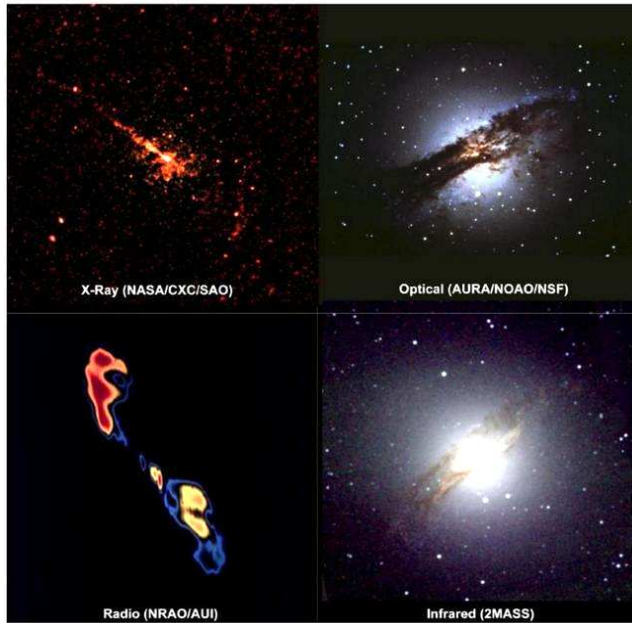


Рис. 29: Радиогалактика Cen A (NGC 5128) в разных спектральных диапазонах
я, заканчивающиеся более диффузными “лопастями” (рис. 29). Пространственная плотность $\sim 10^{-6}$ Мпк $^{-3}$.

Квazarы (QSO) – класс активных ядер, отличающихся очень высокой светимостью ($L \geq 10^{11} L_{\odot}$, $M_V \leq -22.5^m$). Примерно 5–10% QSO являются сильными радиоисточниками. Основные особенности: сильные и широкие эмиссионные линии (рис. 28), сильная переменность во всех спектральных диапазонах от радио до гамма-диапазона (годы – часы), нетепловой спектр излучения (обычно описывается степенным законом $F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$, где $\alpha \approx 0 \div 1$). Относительно редки – пространственная плотность $\sim 10^{-7 \div -8}$ Мпк $^{-3}$; пред-

Блазары (объекты типа BL Lac) характеризуются значительной переменностью в оптическом и радио диапазонах, сильной и переменной оптической поляризацией ($\geq 3 - 4\%$), очень слабыми спектральными линиями.

Радиогалактики – объекты (в большинстве случаев – гигантские эллиптические галактики), чье радиоизлучение в тысячи превышает радиоизлучение обычных галактик. Светимость в радиодиапазоне $\geq 10^{41}$ эрг/с. Синхротронный механизм излучения – выброс облаков релятивистских частиц, движущихся в магнитном поле. Морфология: радиоизлучающая оболочка, длинные “джеты” – выбросы из ядра в противоположных направлениях, заканчивающиеся более диффузными “лопастями” (рис. 29).

Сейфертовские галактики – спиральные галактики с яркими звездообразными ядрами и сильными широкими линиями излучения в спектре. Светимость активного ядра $M_V \geq -22.5^m$. Переменность,

нетепловой спектр излучения. Два типа: доплеровская ширина разрешенных спектральных линий $\sim 1000\text{--}5000$ км/с, запрещенных ≤ 1000 км/с (Sy 1); ширины разрешенных и запрещенных линий ~ 500 км/с (Sy 2). Ядра галактик типа Sy 2 в среднем слабее активных ядер типа Sy 1. Встречаемость $\sim 10^{-4}$ Мпк $^{-3}$. LINERs.

Другие типы необычных галактик – ультраяркие в ИК диапазоне галактики (UFIR), галактики со вспышкой звездообразования.

Значение – энергетические установки, вклад во вторичную ионизацию Вселенной, влияние на эволюцию галактик и межзвездной среды, изучение поведения вещества в экстремальных условиях.

5.2 Механизмы активности и унифицированная схема активного ядра

Требуется объяснить – компактность ($\sim 10^{15}$ см), большое энерговыделение от гамма до радиодиапазона, сильную квазипериодическую переменность, нетепловой спектр, широкие линии излучения, выбросы из ядер – джеты.

Предложенные механизмы – вспышки сверхновых в компактном ядерном звездном скоплении, массивная замагниченная звезда.

Общепринятый механизм – аккреция газа на сверхмассивную черную дыру. Эффективность энерговыделения при аккреции на черную дыру: 6% – неврацающая черная дыра (черная дыра Шварцшильда), 42% – вращающаяся (черная дыра Керра).

Черная дыра в центре Млечного Пути. Свидетельства существования массивных черных дыр в ядрах других галактик ($M_{BH} \sim 10^6 - 10^9 M_{\odot}$): кинематика околядерных газовых дисков, кинематика звезд в окрестности ядра, запаздывание переменности эмиссионных линий относительно континуума (эхокартирование), рентгеновская переменность активных ядер и пр.

Различные типы активных ядер галактик имеют в целом сходную структуру (черная дыра, аккреционный диск, газопылевой тор) и отличаются в первую очередь ориентацией относительно наблюдателя – рис. 30.

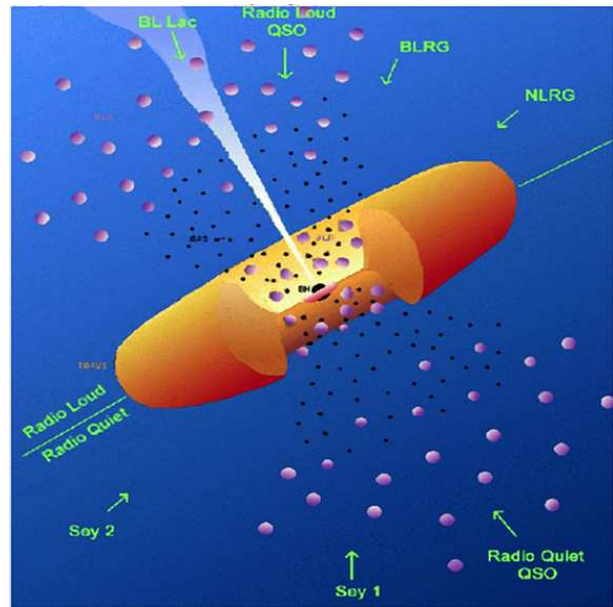


Рис. 30: Унифицированная схема строения активного ядра галактики

Гл. 14. Элементы космологии

Космология Аристотеля–Птолемея, Н. Коперник, Д. Бруно и Т. Диггс (разрушение сферы неподвижных звезд), Т. Браге (разрушение хрустальных сфер).

1 Космология Ньютона и ее проблемы

Фотометрический и гравитационный парадоксы, способы их решения.

2 Теоретические основы современной космологии

ОТО, модели А. Эйнштейна (1917) и А.А. Фридмана (1922, 1924), космологический принцип, космологическая постоянная.

3 Наблюдательные основы космологии

3.1 Расширение Вселенной

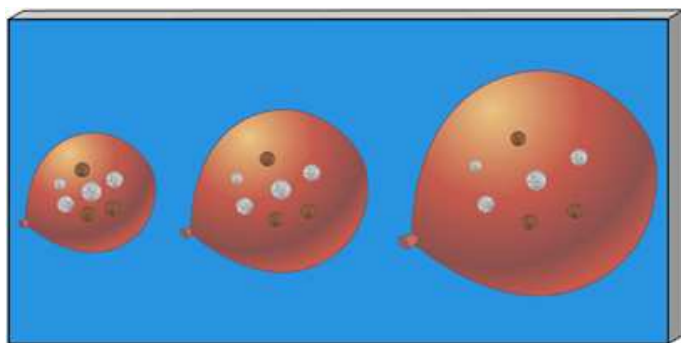


Рис. 31: Трехмерная модель расширяющейся Вселенной

(их наблюдаемое растяжение), рост температуры реликтового излучения с z ($T(z) = T_0 \cdot (1 + z)$), рост доли взаимодействующих галактик с z ($\propto (1 + z)^3$).

Открытие расширения – $V = H_0 \cdot r$ (Э. Хаббл, 1929), различные интерпретации закона Хаббла, линейный закон Хаббла – следствие однородности и изотропии Вселенной, масштабный фактор $a(z) = a_0/(1 + z)$, уравнение для критической плотности (ньютоновский подход) – рис. 31.

Наблюдательные тесты расширения – тест Толмена (поверхностная яркость – красное смещение), кривые блеска сверхновых SN Ia

3.2 Реликтовое излучение

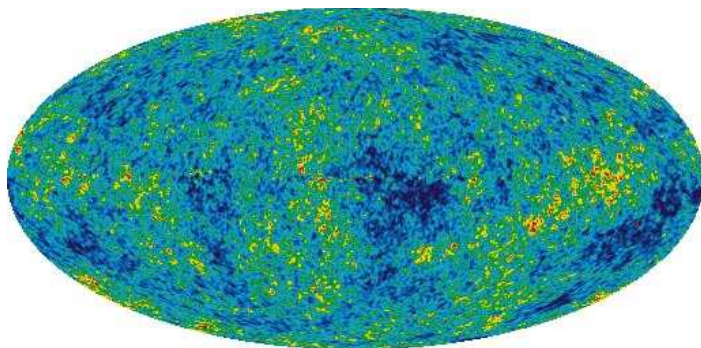


Рис. 32: Распределение температуры реликтового излучения по небесной сфере (WMAP)

Предсказание – Г. Гамов, Р. Альфер, Р. Херман (1940-е), открытие – А. Пензиас, Р. Вилсон (1965). Свойства – высокая степень изотропии, чернотельный спектр с $T = 2.726$ К, $\lambda_{max} \approx 1$ мм.

Открытие флуктуаций температуры реликтового излучения – спутник COBE (1992), амплитуда флуктуаций $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ на масштабах $\sim 1^\circ - 10^\circ$ (рис. 32).

Происхождение: начало расширения – вещество и излучение находятся в состоянии термодинамического равновесия при очень большой температуре; расширение, охлаждение ($T \propto (1 + z)^{-1}$); при падении температуры до $T \approx 3000$ К происходит рекомбинация свободных электронов с протонами и образование атомов H (рекомбина-

ция He происходит чуть раньше); вещество и излучение перестают взаимодействовать и оставшееся от эпохи рекомбинации излучение (реликтовое) продолжает охлаждаться, сохраняя определенные свойства (например, форму спектра, амплитуду и спектр флуктуаций), присущие ему в эпоху формирования, до $z = 0$. Эпоха рекомбинации была при $z \approx 3000/2.7 \sim 1000$ или примерно через $4 \cdot 10^5$ лет после начала космологического расширения.

Реликтовое излучение как средство для измерения динамики и геометрии Вселенной.

3.3 Содержание элементов

H и He образуются на ранних стадиях эволюции Вселенной ($t \leq 300^s$, $T \leq 10^9$ K), более тяжелые элементы – в процессе звездной эволюции. Расчеты первичного нуклеосинтеза дают содержания легких элементов ($\approx 75\%$ H, $\approx 25\%$ He по массе + немного D, ^3He и ^7Li), согласующиеся с наблюдениями.

Первичные обилия дейтерия и ^3He зависят от плотности барионного вещества во Вселенной (Ω_b). Из наблюдений следует, что $0.03 \leq \Omega_b \leq 0.05$. Вклад светящегося вещества ~ 0.005 , следовательно, должно существовать темное барионное вещество, масса которого превышает массу, содержащуюся в звездах (межгалактический газ?).

3.4 Возраст Вселенной и способы его оценки

Методы ядерной космохронологии – изучаются относительные содержания долгоживущих радиоактивных изотопов и продуктов их распада в веществе Земли, Луны, метеоритов. Стандартные “часы” – $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ ($\tau \approx 20 \cdot 10^9$ лет), $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ (10^9 лет), $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ($6 \cdot 10^9$ лет). Возраст Солнечной системы – 4.6 млрд. лет. Оценка времени, предшествовавшего образованию Солнечной системы, в течение которого формировались изотопы тяжелых элементов $\approx 5 \cdot 10^9$ лет. Следовательно, оценка возраста локальной области Млечного Пути и, соответственно, нижняя оценка возраста Вселенной $\approx 10^{10}$ лет.

Оценка возраста на основе теории звездной эволюции. Возраст самых старых звезд и шаровых скоплений Галактики $(1.25 \pm 0.15) \cdot 10^{10}$ лет. Моделирование звездных населений далеких галактик. Возраст Вселенной на основе наблюдаемого темпа ее расширения – $1.4 \cdot 10^{10}$ лет.

3.5 Скрытая масса во Вселенной

Свидетельства существования скрытой массы на разных масштабах: скорость убегания звезд в Млечном Пути, протяженные плоские кривые вращения, галактики с полярными кольцами, динамика карликовых спутников в окрестностях массивных галактик, движения галактик в группах и скоплениях, гравитационное линзирование (рис. 33), рентгеновские короны галактик и скоплений галактик, морфология (и кинематика) разрушающихся спутников, приливные структуры галактик, тонкие звездные диски, предсказания теории первичного нуклеосинтеза, наблюдаемые характеристики крупномасштабной структуры Вселенной и пр.

Кандидаты в барионную темную материю: коричневые карлики, остатки звездной эволюции, хо-

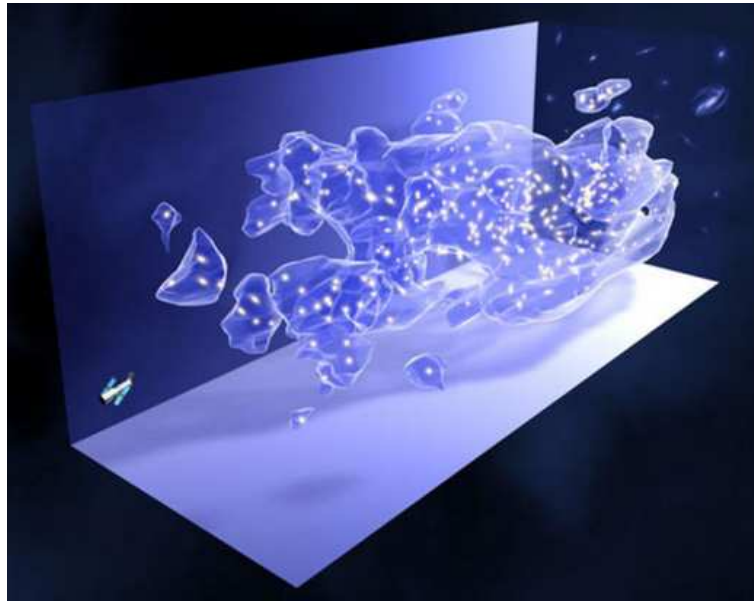


Рис. 33: Крупномасштабная карта распределения скрытой массы, построенная методом слабого гравитационного линзирования (обзор COSMOS)

лодный молекулярный газ и др. Небарионная темная материя: аксионы, массивные слабо взаимодействующие частицы – WIMPs (еще не открыты).

3.6 Крупномасштабная структура

Характеристики крупномасштабного сгущивания галактик (размеры самых больших структур, параметры пустот, зависимость флуктуаций плотности от масштаба усреднения и пр.) являются важными космологическими тестами, поскольку они зависят от модели Вселенной.

3.7 Ускоренное расширение Вселенной

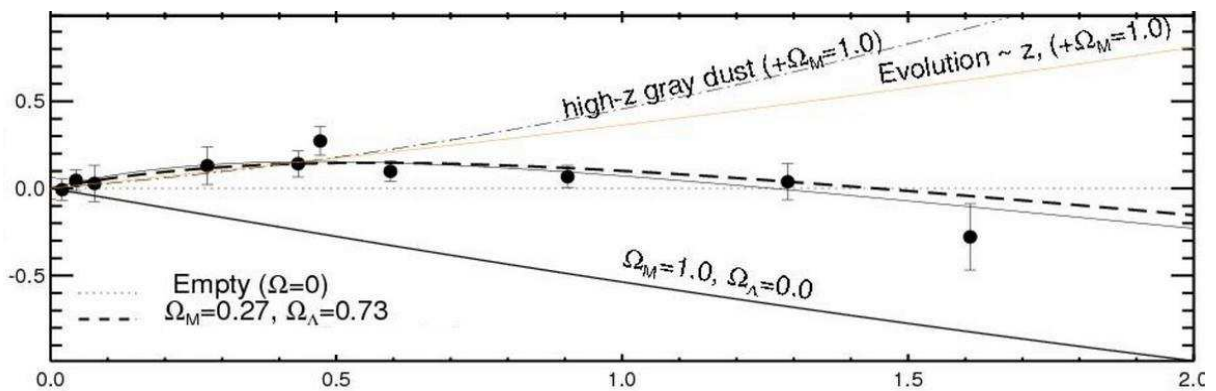


Рис. 34: Разность наблюдаемых модулей расстояния до SN Ia и ожидаемых в модели Вселенной с нулевой плотностью (вертикальная ось) в зависимости от красного смещения (горизонтальная ось). Кружки – усредненные данные для 157 далеких сверхновых, штриховая линия – модель плоской Вселенной с ненулевой космологической постоянной

1998 г. – открытие ускорения расширения Вселенной по наблюдениям кривых блеска далеких SN Ia.

(Открытие сделано независимо двумя группами во главе с С. Перлмуттером и Б. Шмидтом.) Согласно наблюдениям, космологические сверхновые находятся от нас дальше, чем это должно быть без ускорения расширения (рис. 34).

Простейшая интерпретация наблюдений: существование космологической постоянной, дающей основной вклад в плотность Вселенной ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$), и приводящей к глобальному отталкиванию вещества, “антигравитации”. Роль космологической постоянной, возможно, играет физический вакуум.

4 Вселенная в целом и ее эволюция

4.1 Интегральные характеристики Вселенной

Анализ характеристик реликтового излучения, данных о космологических сверхновых и о крупномасштабной структуре приводят к следующим характеристикам Вселенной:

возраст $t_0 = 13.7$ млрд. лет;

постоянная Хаббла $H_0 = 70$ км/с/Мпк;

полная плотность $\Omega = 1.00$ ($\rho \approx 10^{-29}$ г/см³);

плотность барионного вещества $\Omega_b = 0.046$;

плотность темной материи $\Omega_{DM} = 0.23$;

плотность темной энергии $\Omega_\Lambda = 0.72$.

(Формальные погрешности приведенных значений составляют $\sim 1\%$, с учетом систематических эффектов погрешности могут быть выше.)

4.2 Эволюция Вселенной

Концепция Мультимира (Мильтиверсума, Мульти-Вселенной).

- Рождение Вселенной 13.7 млрд. лет назад ($t = 0$) из сингулярности (квантовая флуктуация скалярного поля?).
- $t \sim 10^{-42} - 10^{-36}$ с – инфляция. Ускоренное расширение пространства под влиянием отрицательного давления вакуума. Распад вакуума, рождение релятивистских частиц обычного вещества, квантовые флуктуации вакуума порождают неоднородности плотности.
- $t \leq 1$ с – рождения и взаимопревращения элементарных частиц, формирование асимметрии вещества и антивещества.
- $t \approx 1 - 300$ с – нуклеосинтез.
- $t \approx 4 \cdot 10^5$ лет ($z \approx 10^3$) – рекомбинация, образование нейтральных атомов, отрыв излучения от вещества, реликтовое излучение (рис. 32). Амплитуда флуктуаций плотности вещества $\sim 10^{-5}$.
- $t \approx 4 \cdot 10^5 - 10^8$ лет ($z \approx 10^3 - 30$) – “темные времена”. Рост первичных возмущений плотности, отсутствие гравитационно-связанных объектов.
- $t \approx 10^8 - 2 \cdot 10^8$ лет ($z \approx 30 - 20$) – образование массивных ($\sim 10^2 - 10^3 M_\odot$) малометаллических звезд – звезды населения III – внутри темных гало массой $\sim 10^5 - 10^6 M_\odot$, обогащение межгалактической среды тяжелыми элементами (рис. 35).

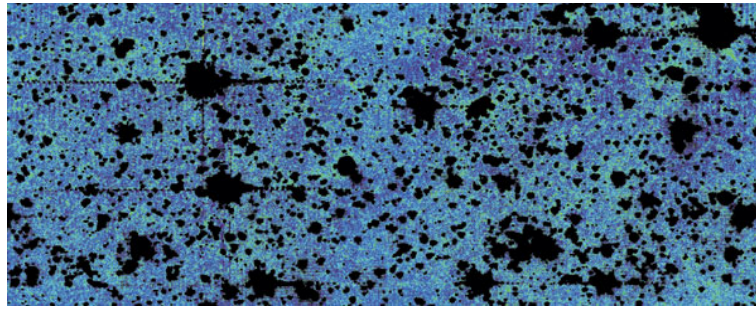


Рис. 35: Глубокое ИК изображение участка неба (Spitzer Space Telescope). Изображения звезд и галактик удалены (черный цвет на рисунке). Флуктуации яркости фона, как предполагается, связаны с существованием массивных звезд на $z \geq 20$

- $t \approx 2 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^8$ лет ($z \approx 20 - 10$) – появление первых галактик. Охлаждение и аккреция газа к центрам обособившихся от космологического расширения относительно массивных темных гало, звездообразование.
- $t \approx 5 \cdot 10^8$ лет ($z \approx 10$) – конец вторичной ионизации Вселенной.
- $t \approx (3 - 6) \cdot 10^9$ лет ($z \approx 1 - 2$) – эпоха максимального удельного темпа звездообразования во Вселенной и темпа слияний массивных галактик, формирование Хаббловской последовательности (рис. 36).

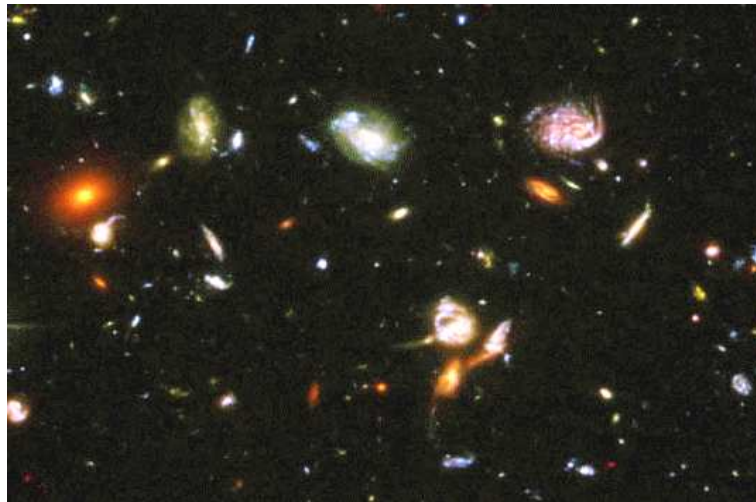


Рис. 36: Участок Сверхглубокого поля КТ Хаббл (HUDF), иллюстрирующий асимметричную и неправильную структуру галактик на $z \sim 1$

- $t \approx 9 \cdot 10^9$ лет ($z \approx 0.5$) – смена замедляющегося расширения Вселенной расширением с ускорением. Формирование Солнца и планет Солнечной системы.
- $t = 13.7 \cdot 10^9$ ($z = 0$) – современная эпоха.

Иллюстративный материал взят из открытых интернет-ресурсов.