

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Радиофизический факультет**

**В. Т. Сарычев**

## **ОСНОВЫ АСТРОФИЗИКИ**

**Учебное пособие**

**Томск 2007**

**ОДОБРЕНО** кафедрой космической физики и экологии

Зав. кафедрой, профессор \_\_\_\_\_ А. Г. Колесник

**РАССМОТРЕНО и УТВЕРЖДЕНО** методической комиссией  
радиофизического факультета

Протокол № \_\_\_\_\_ от “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2007г.

Пред. комиссии, профессор \_\_\_\_\_ С.Н. Владимиров

В настоящем пособии представлен обзор методов и инструментов астрофизических исследований. Приведено краткое описание объектов исследования, начиная с Солнечной системы и кончая вселенной в целом. Прилагается список литературы, используемой при подготовке пособия. Поскольку автор старался включить в пособие основные новейшие достижения астрофизических исследований, то при написании пособия ему приходилось прибегать к услугам Интернета.

Пособие предназначено для студентов физических факультетов университета.

**АВТОР:** д.ф.-м. н

В. Т. Сарычев.

## Содержание

1. Введение	5
1.1. Астрофизические величины	7
1.2. История радиоастрономии	8
2. Основы теории переноса излучения	9
2.1. Основные понятия	9
2.2. Абсолютное черное тело, Формула Планка	10
2.3. Уравнение переноса излучения	14
3. Звёзды	17
3.1. Звездная величина	17
3.2. Абсолютная звездная величина	19
3.3. Соотношение масса – светимость	19
3.4 Звезды самой высокой светимости в галактике	20
3.5 Классификация звезд	21
3.6 Пионеры классификации	22
3.7 Спектральные классы	23
3.8 Диаграмма Герцшпрунга-Рессела	24
3.9 Кратные звёзды	25
3.10. Звёздные скопления и ассоциации	28
4. Галактики	31
4.1. Наша Галактика	31
4.2. Классификация галактик	32
4.3. Лацертиды, сейфертовские галактики, радиогалактики, квазары	33
5. Ядерная астрофизика	35
5.1. Теорема вириала	35
5.2. Источники энергии излучения звезд	37
5.3. Прямая проверка теории - наблюдение солнечных нейтрино	39
6. Эволюция звезд после главной последовательности	39

6.1. Белые карлики	41
6.2. Предел Чандрасекара	41
7. Нестационарные звёзды	42
7.1. Пульсирующие звёзды, цефеиды	42
7.2. Вспыхивающие и взрывающиеся звёзды	44
8. Новые и Сверхновые звёзды	46
8.1. Новые звёзды	47
8.2. Сверхновые звёзды	48
8.3 Остатки сверхновых и их взаимодействие с межзвездной средой	51
9. Нейтронные звёзды	52
9.1. Радиопульсары	53
9.2. Рентгеновские пульсары	57
10. Рентгеновская астрономия	58
10.1. Механизмы рентгеновского излучения	58
10.2. Приборы рентгеновской астрономии	60
10.3. История рентгеновской астрономии	62
10.4. Источники космического рентгеновского излучения	64
11. Гамма астрономия	66
11.1. Источники гамма излучения	67
11.2. Вспыхивающие гамма источники	68
12. Солнечная система	70
12.1. Планеты	71
12.2. Пояс Койпера	72
12.3. Кометы	73
12.4. Солнце	78
12.5. Космогония	84
13. Космология	86
Литература:	89

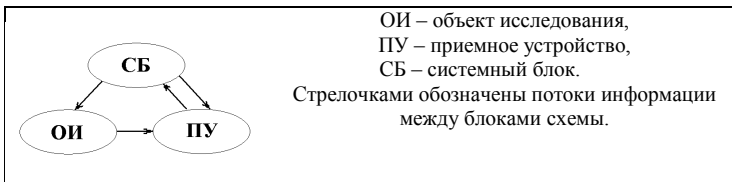
# 1. Введение

Астрофизика является одним из разделов древнейшей из наук – астрономии. Для понимания её места в этой науке следует знать главные разделы астрономии [1]:

- 1) *Астрометрия* – учение о методах тригонометрических измерений на небе.
- 2) *Теоретическая астрономия* – определение орбит небесных тел по их видимым положениям и решение обратной задачи (определение эфемерид по известным элементам орбиты).
- 3) *Небесная механика* – изучение законов движения небесных тел, определение их массы и формы.
- 4) *Астрофизика* – изучение строения, физических и химических свойств небесных объектов.
- 5) *Звёздная астрономия* – изучение закономерностей в распределении и движении звезд, звездных систем, межзвездной материи.
- 6) *Космогония* – происхождение и эволюция небесных тел (звёзды, Солнечная система, Земля и т.п.).
- 7) *Космология* – наука об общих закономерностях строения и эволюции Вселенной.

Астрофизика относится к наиболее молодому и бурно развивающемуся разделу астрономии. Астрофизика призвана ответить на самые фундаментальные вопросы астрономии: как устроена наша Вселенная, как она возникла, и что с ней произойдет в будущем? Для ответа на эти вопросы она вынуждена обращаться за помощью к различным разделам физики.

Процесс получения новых знаний в любой из естественных наук схематично можно представить следующей схемой



Применительно к астрофизике ОИ могут быть любые космические тела и среда их обитания.

К ОИ относятся:

1. Звёзды, звёздные скопления, звёздные ассоциации.
2. Галактики, скопления галактик.
3. Солнечная система.
4. Межпланетная среда.
5. Межзвёздная среда.
6. Космические магнитные поля.
7. Квазары, блазары, пульсары.
8. Космические лучи.
9. Реликтовое излучение.
10. Вселенная в целом.

ПУ. Долгое время глаз, механические инструменты по измерению углов между лучами света и часы – вот весь арсенал инструментов, который использовали астрономы в своих исследованиях. В 1609 г. Г. Галилей создал первый телескоп. Появление телескопа можно считать первым шагом на пути зарождения астрофизики. Второй шаг совершил И. Ньютон. Он показал, что солнечный свет является сложным объектом, несущим большую информацию. Но как расшифровать эту информацию? Основы спектрального анализа видимого излучения были заложены Р. Бунзеном и Г. Кирхгофом полтора века назад. Однако видимое излучение составляет лишь небольшой участок используемого в настоящее время астрофизикой спектра излучения космических объектов. Отдавая дань традиции, устройства, принимающие это излучение, называют телескопами, хотя их внешний вид, порой ничем не напоминает привычную форму оптических телескопов.

В соответствии с частотой принимаемого излучения существуют следующие ПУ:

	Диапазон длин волн,	Å
1. Радиотелескопы,	$10^{-1} \div 10^6$ см.	
2. Инфракрасные телескопы,	$7 \cdot 10^{-5} \div 10^{-1}$ см.	
3. Оптические телескопы,	$4 \cdot 10^{-5} \div 7 \cdot 10^{-5}$ см.	
4000÷7000		
4. Ультрафиолетовые телескопы,		100÷4000
5. Рентгеновские телескопы,	0.1÷100 кэВ	100÷0.1
6. Гамма телескопы,	От 0.1 МэВ и выше.	
7. Нейтринные телескопы.		
8. Детекторы корпускулярного излучения.		

*СБ в данной схеме включает в себя:*

1. Астрофизиков.
2. Теоретические модели ОИ.
3. Модели формирования и распространения сигналов от ОИ к ПУ.
4. Программы управления ПУ.
5. Методы и программы обработки получаемой информации.

«Звезды сообщают нам о себе только то, что хотят...» [2.]. Астрофизика в отличие от других наук лишена возможности (за редким исключением) активного воздействия на ОИ. Результатом астрофизических исследований являются модели, созданные на основе пассивных наблюдений. Адекватность таких моделей ОИ никогда не может быть строго подтверждена. Например, современная физика в качестве источника энергии звезд может предложить нам только реакции термоядерного синтеза. Но 100% уверенности, что это действительно так, нет. Мы наблюдаем лишь поверхность звезд. Даже внутреннее строение нашей Земли достоверно неизвестно. Наши знания ограничиваются умозрительными моделями. Доверие к моделям определяется степенью их соответствия той информации, которую мы получаем об ОИ, и объемом этой информации.

### **1.1. Астрофизические величины**

1. Постоянная тяготения  $G=6.668 \cdot 10^{-8}$  дин см<sup>2</sup>/г<sup>2</sup>.
2. Скорость света  $c=2.9979 \cdot 10^{10}$  см/с.
3. Расстояния. Среднее расстояние Земли от Солнца - астрономическая единица а. е.=  $1.496 \cdot 10^{13}$  см. Парсек  $pc=3.0857 \cdot 10^{18}$  см= $206265$  а. е.= $3.262$  св. года. Св. год= $9.46 \cdot 10^{17}$  см. Радиус Солнца  $R_{\odot}=6.96 \cdot 10^{10}$  см.
4. Масса Солнца  $M_{\odot}=1.991 \cdot 10^{33}$  г.
5. Солнечная постоянная ( $S_0$ ) – интегральный поток солнечного излучения на расстоянии 1 а. е. на единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей.  $S_0=1367$  Вт/м<sup>2</sup>.
6. Единица спектральной плотности потока излучения – янский.  $1 \text{ Ян}=10^{-26}$  Вт/(м<sup>2</sup> Гц).

## 1.2. История радиоастрономии

О том, что небесные тела могут излучать в радиодиапазоне, ученые догадывались и раньше, но прошло почти 70 лет с тех пор, как Максвелл в 1870-х гг. предсказал существование электромагнитных волн, прежде чем радиофизика и радиотехника нашли себе применение в астрономических наблюдениях.

Важную роль в процессе внедрения радионаблюдений в астрономии сыграли радиолюбители – они показали возможность трансатлантической радиосвязи, после чего американская телефонная компания Bell Telephone Labs решила изучить возможность использования коротковолновой радиосвязи для межконтинентальной телефонии, надеясь таким образом сэкономить на прокладке кабеля по дну океана. Изучение помех было поручено молодому инженеру Карлу Янскому, который в 1932 г и обнаружил на построенной им антенне (вращающаяся антенная решетка размером 30.5 м в длину и 3.7 м в высоту) "мешающее" излучение Млечного Пути на 14.6 м. Ширина луча антенны составляла 27 °.

Английский радиоинженер Грот Ребер построил у себя во дворе радиотелескоп с параболическим рефлектором диаметром 9.5 м. Ребер провел свои первые наблюдения на волне 9.7 см, но ничего не нашел и стал увеличивать длину волны. Только на волне 1.87 м весной 1939 года обнаружил, наконец, излучение с заметной концентрацией в плоскости Галактики и опубликовал некоторые предварительные результаты. Ребер построил первую карту распределения радиояркости вдоль млечного Пути, обнаружив пик излучения в направлении на центр Галактики, а также обнаружил радиоизлучения в направлении на созвездия Лебедя и Кассиопеи. Статья Ребера сначала была отклонена редакцией *Astrophysical Journal* и опубликована лишь в 1944 г. решением редактора журнала Отто Струве. Так начиналась радиоастрономия.

Вкратце о некоторых дальнейших открытиях в радиоастрономии:

1944 Голландский ученый Ван де Хюлст предсказал возможность радиоизлучения межзвездного нейтрального водорода на волне 21 см.

1951 г. Первый космический радиоисточник отождествлен с другой галактикой – Лебедь А (Бааде, Минковский).

Обнаружена линия нейтрального водорода 21 см. (Юэн, Перселл)



1961 Дискретный космический радиоисточник отождествлен со звездобразным оптическим объектом (квазар 3С 48) Мэтью и Сэйндейдж, Маунт Вилсон и Маунт Паломар, США.

1963 Обнаружена линия гидроксила ОН 18 см.

1965 Открытие Пензиасом и Вильсоном фонового микроволнового излучения (реликтовое излучение), предсказанного Гамовым и Альфвенем, исходя из теории "горячей Вселенной".

1967. Открытие пульсаров. Аспирантка профессора Хьюиша Джоселинн Белл при исследовании мерцаний на солнечной плазме обнаружила источник, который давал короткие (~ 50 миллисекунд) импульсы, повторяющиеся через строго постоянный период ~1с.

## 2. Основы теории переноса излучения

### 2.1. Основные понятия

*Законы Кирхгофа:* 1) накаленное твердое тело, нагретые жидкость или газ при достаточном давлении излучают непрерывный спектр; 2) нагретый газ при низком давлении излучает спектр, состоящий из отдельных ярких линий; 3) газ, помещенный перед более горячим источником непрерывного излучения, создаёт темные линии или спектр поглощения, налагающийся на непрерывный спектр.

Энергия излучения  $dE_v$ , поступающая в ПУ, определяется следующим выражением

$$dE_v = I_v \cos \theta d\sigma d\Omega dv dt, \quad (2.1)$$

где  $I_v$  — спектральная интенсивность излучения,

$\theta$  — угол между направлением излучения и нормалью к площадке, через которую излучение попадает в ПУ,

$d\sigma$  — площадь окна ПУ,

$d\Omega$  — телесный угол, в пределах которого поступает излучение,

$dv$  — полоса частот принимаемого излучения,

$dt$  — время накопления излучения приемником.

Спектральная плотность энергии излучения определяется выражением

$$u_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu d\Omega. \quad (2.2)$$

Здесь  $c$  – скорость света.

Спектральная плотность потока излучения  $H_\nu$  определяется выражением

$$H_\nu = \int I_\nu \cos \theta d\Omega. \quad (2.3)$$

Соответственно, полный поток излучения  $F$  определяется интегралом

$$F = \int H_\nu d\nu.$$

Если объект излучает изотропно, то его общее излучение (светимость) может быть вычислено согласно выражению

$$L = 4\pi R^2 F. \quad (2.4)$$

Общее излучение Солнца  $L_\odot = 3,83 \cdot 10^{33}$  эрг/с.

Давление излучения определяется выражением

$$p_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu \cos^2 \theta d\Omega. \quad (2.5)$$

## 2.2. Абсолютное черное тело, Формула Планка

Когда среда и излучение находятся в термодинамическом равновесии, мы приходим к понятию абсолютно черного тела (АЧТ). Это понятие впервые было предложено Кирхгофом в 1862 г. Согласно закону Кирхгофа интенсивность излучения АЧТ определяется только температурой тела и не зависит от его химического состава.

Закон Кирхгофа не определяет вид функциональной зависимости интенсивности излучения от температуры и частоты. В 1879 г. И. Стефан экспериментально установил, что поток излучения нагретого тела пропорционален четвертой степени температуры. В 1884 Л.

Больцман теоретически вывел этот закон. Закон Стефана-Больцмана имеет вид

$$F = \int I_{\nu} \cos \theta d\Omega d\nu = \pi \int I_{\nu} d\nu = \sigma_{sb} T^4. \quad (2.6)$$

Однако закон Стефана-Больцмана совершенно не вскрывает вид функциональной зависимости  $I(\nu, T)$  или  $u(\nu, T)$ . В 1893 г. В. Вин, применив понятие температуры и энтропии к тепловому излучению, вывел закон смещения, согласно которому максимум излучения в спектре смещается в сторону увеличения частоты пропорционально увеличению температуры. Он же предложил выражение для плотности энергии излучения в виде

$$u(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T).$$

Вид функции  $f(\nu, T)$  не был определен. Лишь в 1896 Вин предложил явное выражение для плотности энергии излучения:

$$u(\nu, T) = c_1 \nu^3 \exp(-c_2 \nu/T). \quad (2.7)$$

Однако в области низких частот это выражение не подтверждалось экспериментом. Окончательно проблема излучения АЧТ была решена М. Планком [5]. В 1900 г. 14 декабря на заседании немецкого физического общества он доложил свою работу «К теории распределения энергии излучения в нормальном спектре». Эта дата по праву считается днем рождения квантовой теории.

При выводе своего знаменитого закона в качестве носителей энергии излучения Планк использовал осцилляторы (резонаторы), плотность которых  $\rho_{\nu}$  он определил согласно классической электродинамике в следующем виде

$$\rho_{\nu} = 8\pi\nu^2 / c^3. \quad (2.8)$$

Плотность энергии излучения  $u(\nu, T)$  определялась произведением средней энергии резонатора  $U$  на их плотность, т.е.

$$u(\nu, T) = \rho_{\nu} U = 8\pi\nu^2 U / c^3. \quad (2.9)$$

Для нахождения средней энергии осциллятора Планк применил приём, который использовал Л. Больцман при выводе функции распределения атомов идеального газа по скоростям. Но если у Больцмана аргументы функции распределения могли изменяться непрерывно, то Планк «разрешил» своим резонаторам иметь лишь дискретные уровни энергии

$$\varepsilon_n = nh\nu, \quad n = 0, 1, \dots$$

Далее, следуя Больцману, Планк определил энтропию ансамбля резонаторов выражением

$$S = k \ln W,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $W$  – количество возможных комбинаций распределения энергии между резонаторами ансамбля.

Выражение для энтропии ансамбля с дискретными уровнями энергии можно представить выражением

$$S = - \sum_n p_n \ln p_n, \quad (2.10)$$

где  $p_n$  – вероятность нахождения осциллятора на  $n$ -м энергетическом уровне.

Учитывая условие нормировки

$$\sum_n p_n = 1,$$

и определение средней энергии осциллятора

$$\sum_n \varepsilon_n p_n = U,$$

из принципа максимума энтропии можно найти выражения для вероятностей:

$$p_n = A \exp(-\mu n h \nu). \quad (2.11)$$

Нормирующий множитель  $A$  определяется выражением

$$A = 1 / \sum_n \exp(-\mu n h \nu) = 1 - \exp(-\mu h \nu).$$

Средняя энергия определяется как

$$U = \sum_n \varepsilon_n p_n = \frac{h \nu}{\exp(\mu h \nu) - 1}.$$

Соответствующее вероятностям (2.11) выражение энтропии имеет вид

$$S = \mu U - \ln A. \quad (2.12)$$

Полный дифференциал этого выражения

$$dS = \mu(dU - U d\nu / \nu).$$

Второй член в правой части выражения соответствует работе, совершенной над ансамблем резонаторов при изменении энтропии ансамбля. Следовательно, всё выражение в скобках представляет собой приращение тепла  $dQ$ . Учитывая второй закон термодинамики ( $dS = dQ/kT$ ), получаем  $\mu = 1/kT$ . Окончательное выражение для плотности лучистой энергии АЧТ принимает вид

$$u(\nu, T) = \rho_\nu U = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 (\exp(h\nu / kT) - 1)}. \quad (2.13)$$

Для АЧТ излучение изотропно, следовательно, интенсивность излучения определяется выражением

$$I(\nu, T) = \frac{c}{4\pi} u = \frac{2h\nu^3}{c^2 (\exp(h\nu / kT) - 1)}. \quad (2.14)$$

Или в длинах волн

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (\exp(hc / \lambda kT) - 1)}. \quad (2.15)$$

Закон смещения Вина:

а) положению максимума выражения (2.14) соответствует значение частоты  $\nu_{max} \approx 5.87 \cdot 10^{10} T$  Гц

б) положению максимума выражения (2.15) соответствует значение длины волны  $\lambda_{max} \approx 0.29/T$  см.

При  $h\nu \gg kT$  выражение (2.13) соответствует спектру Вина (2.7), а при обратном неравенстве  $h\nu \ll kT$  из (2.14) получается закон Рэлея – Джинса:

$$I(\nu, T) = \frac{2kT}{c^2} \nu^2.$$

Этот закон был выведен из классических представлений Дж. Рэлея (1900 г.) и независимо Дж. Джинсом. (1905 г.).

Выражение (2.13) описывает плотность излучения АЧТ, но оно совершенно не раскрывает свойства отдельного фотона. Почему, проделав путь в миллиарды световых лет, фотон не «расползается» согласно теории Максвелла, а сохраняет свою энергию в малом пространственном объеме? Этот вопрос ставил Планк, но ответа на него до сих пор нет.

### 2.3. Уравнение переноса излучения

Уравнение переноса излучения имеет вид

$$\cos \theta \frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu, \quad (2.16)$$

где  $\alpha_\nu$  - коэффициент поглощения, а  $j_\nu$  - коэффициент излучение вещества.

Если поглощение отсутствует, то изменение интенсивности излучения вдоль луча ( $\theta=0$ ) на пути от  $s_0$  до  $s$  определится выражением

$$I_\nu(s) = I_\nu(s_0) + \int_{s_0}^s j_\nu(s') ds'.$$

В отсутствии источников излучения

$$I_{\nu}(s) = I_{\nu}(s_0) \exp\left(-\int_{s_0}^s \alpha_{\nu}(s') ds'\right).$$

Интеграл  $\tau_{\nu} = \int_{s_0}^s \alpha_{\nu}(s') ds'$

называется оптической толщиной слоя среды на пути  $[s_0, s]$ . Производя замену  $d\tau_{\nu} = \alpha_{\nu} ds$ , выражение (2.16) можно записать в следующем виде:

$$\cos \theta \frac{dI_{\nu}}{d\tau_{\nu}} = I_{\nu} - S_{\nu}, \quad (2.17)$$

где  $S_{\nu} = j_{\nu}/\alpha_{\nu}$  – функция источника.

Методы решения уравнения переноса излучения интенсивно разрабатывались в начале прошлого века (А. Шустер, 1905; К. Шварцшильд, 1906; А. Эддингтон, 1926). В уравнении переноса в общем случае для определения коэффициента излучения  $j_{\nu}$  необходимо знать источники излучения. В условиях лучистого равновесия между коэффициентом излучения и интенсивностью излучения выполняется соотношение

$$4\pi \int_0^{\infty} j_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} \alpha_{\nu} \int I_{\nu} d\Omega d\nu. \quad (2.18)$$

Смысл этого выражения прозрачен – сколько энергии излучения поглощается в единице объёма, столько и излучается. В фотосфере Солнца условие лучистого равновесия соблюдается.

При коэффициенте поглощения не зависящем от частоты (серое тело) уравнение лучистого равновесия имеет вид

$$S = \frac{1}{4\pi} \int I d\Omega; \quad I = \int_0^{\infty} I_{\nu} d\nu. \quad (2.19)$$

Поиск решения уравнения переноса излучения проводился многими авторами. Ниже приводятся некоторые из этих решений.

1) Приближение Шварцшильда – Шустера:

$$S(\tau) = F(\tau + 1/2).$$

2). Приближение Эддингтона:

$$S(\tau) = F(3\tau/4 + 1/2).$$

3). Точное решение Хопфа:

$$S(\tau) = \frac{3}{4} F(\tau + q(\tau)).$$

Здесь  $q(\tau)$  - монотонная функция  $\tau$ , изменяющаяся в узком диапазоне:  $q(0)=1/\sqrt{3}\approx 0.58$ ,  $q(\infty)=0.71$ . Величина  $F=H/\pi$ , где  $H$  – полный поток излучения через единичную площадку (освещенность).

Используя закон Стефана – Больцмана, определяем эффективную температуру звезды выражением  $L=4\pi R^2 H=4\pi R^2 \sigma_B T_e^4$ , отсюда  $F=\sigma_B T_e^4/\pi$  ( $L$  и  $R$  - светимость и радиус звезды). Применение закона Стефана – Больцмана к решению уравнения переноса излучения позволяет определить температуру излучения, как функцию оптической глубины:

$$\begin{aligned} T^4(\tau) &= \frac{3}{4} T_e^4(\tau + q(\tau)) = \sqrt{3} T_0^4(\tau + q(\tau)); \\ T_0^4 &= \sqrt{3} T_e^4 / 4, \quad T_0 = 0.811 T_e. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Для Солнца  $T_e=5776$  К,  $T_0=4684$  К.

Кроме эффективной температуры в астрофизике существуют понятия яркостной и цветовой температуры. Яркостная температура определяется для различных участков спектра. Для её вычисления необходимо знать интенсивность излучения на выбранной длине волны  $I_\lambda$ , расстояние до звезды  $r$  и её радиус  $R$ . Вычисляется величина  $x=I_\lambda(r/R)^2$ . Далее, согласно формуле Планка (2.15) находится соответствующая этой величине температура. Из-за отличия излучения звезд от излучения АЧТ их яркостная температура оказывается различной в разных участках спектра. Например, у Солнца  $T(4500\text{\AA})=6200$  К и  $T(6500\text{\AA})=6000$  К.



В отличие от яркостной температуры цветовая температура определяется по результатам сравнения наклона кривой  $I_\lambda$  в выбранном интервале длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$  с наклоном кривой Планка в этом же интервале. Цветовая температура вдоль спектра меняется ещё сильнее, чем яркостная.

## 3. Звёзды

### 3.1. Звездная величина

Звездная величина введена Гиппархом Родосским во 2 в. до н.э. как мера относительного блеска звезд. Все видимые невооруженным глазом звёзды разделялись на шесть групп. Самым ярким звёздам приписывалась первая звёздная величина, самым слабым – шестая. Субъективность и грубость этой шкалы – очевидна. Изобретение телескопа позволило распространить эту шкалу на более слабые звёзды. Выяснилось, что эта шкала – логарифмическая. Скорее всего, логарифмический характер шкалы определяется физиологическими свойствами человеческого глаза. Отсюда субъективность оценки звёздных величин. Например, правнук основателя Пулковской обсерватории О. Струве пишет [6], что различие в определении звездных величин слабых звезд у В. Гершеля и его прадеда В. Я. Струве могло доходить до пяти звездных величин. Огромный прогресс в избавлении от субъективизма оценок звездных величин внес директор Гарвардской обсерватории Эдуард Чарльз Пикеринг. Он начал широко использовать в астрономических наблюдениях фотографию и фотометрию.

Для определения звездных величин Н. Погсон (1857 г.) предложил использовать формулу

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg(E_2 / E_1). \quad (3.1)$$

Здесь  $m$  – видимая величина звезды,  $E$  – создаваемая этой звездой освещенность в точке наблюдения.

Для измерения звездной величины на основе выражения (3.1) используются эталонные звезды. Э. Пикеринг в качестве эталонов предложил использовать звезды Северного Полярного Ряда.

В настоящее время особая необходимость использовать отдельные звёзды в качестве эталона отпала. Тем более потому, что не все

звезды СПР имеют постоянную светимость. За 0-пункт шкалы зв. величин принимают звезду, создающую освещенность (вне земной атмосферы)  $2,77 \cdot 10^{-10}$  люмен/см<sup>2</sup>(фот) $\cong 4.07 \cdot 10^{-6}$  эрг/см<sup>2</sup>с. Учитывая, что видимая величина определяется потоком фотонов в окрестности  $\lambda=5500 \text{ \AA}$  (энергия одного фотона  $\sim 3.6 \cdot 10^{-12}$  эрг), можно оценить этот поток величиной  $\sim 10^6$  квант/см<sup>2</sup>с.

Современные приборы позволяют оценивать излучение вплоть до одного фотона. Квантовый выход: глаза -  $\eta=10\%$ , фотоэмульсия - 1-5%, ФЭУ - до 50-70%, ПЗС - свыше 50-70 %.

Наряду с видимой величиной используется болометрическая звездная величина, которая определяется полным потоком излучения во всей полосе частот. Звезда, у которой  $m_{\text{bol}}=0$ , на границе земной атмосферы даёт поток  $2.54 \cdot 10^{-5}$  эрг/см<sup>2</sup>с.

"Цвет" звезды с распределением энергии в спектре  $F(\lambda)$  определяется как разница зв. величин на разных длинах волн:

$$m(\lambda_1) - m(\lambda_2) = -2.5 \cdot \lg \frac{aF(\lambda_1)}{bF(\lambda_2)}, \quad (3.2)$$

где  $a, b$  - коэффициенты, зависящие от прибора.

В фотометрии обычно используется три окна, обозначаемые буквами  $U, B, V$ . Ниже в таблице приводятся значения эффективной длины волны  $\lambda_{\text{эфф}}$ , ширины окна  $\Delta \lambda$  (на границе чувствительность уменьшается вдвое относительно максимума),  $F_{\lambda}(0,0)$  - поток в полосе  $100 \text{ \AA}$ , принимаемый от звезды  $0^{\text{m}}$ .

Цвет	$\lambda_{\text{эфф}}$	$\Delta \lambda$	$F_{\lambda}(0,0) 10^{-7}$ эрг/см <sup>2</sup> 100 $\text{\AA}$
$U$	$3650_{+200}^{-100}$	530	4,35
$B$	$4400_{+100}^{-70}$	1000	7,20
$V$	$5470_{+30}^{-10}$	850	3,92

Используя выражение (3.2) и данные таблицы, можно вычислять звездные величины  $m_U, m_B$  и  $m_V$ . В общем случае у каждого объекта эти величины различны и совпадают между собой лишь для звезды  $0^{\text{m}}$  (класс A0)  $m_U = m_B = m_V = 0^{\text{m}}$ . В качестве показателя цвета используется разность:  $C_{BV} = m_B - m_V$ ,  $C_{UB} = m_U - m_B$ .

Кроме приведенных показателей цвета используются и другие: например,  $C = m_{\text{pg}} - m_{\text{pv}}$ , где  $m_{\text{pg}}$  - фотографическая и  $m_{\text{pv}}$  - фотовизу-

альная звёздные величины. Первоначально использовался именно этот показатель цвета, поскольку фотометрические наблюдения проводились на основе фотографии.

### 3.2. Абсолютная звездная величина

Зв. величина, которую имел бы источник на расстоянии в 10 пк., называется абсолютной зв. величиной. Учитывая это определение, можно написать

$$m - M = 5 \lg(r/10 \text{ пк}) + A(\lambda) = 5 \lg(r, \text{пк}) - 5 + A(\lambda).$$

Здесь  $A$  - поправка на межзвёздное поглощение.

*Пример:* Освещенность Солнца при  $r=1$  а. е. равна 13.6 фот, следовательно  $m_{\odot} = -2.5(\lg(13.6/2.77) + 10) = -26.73$ . Абсолютная зв. величина  $M_{\odot} = m - 5 \lg(a. \text{ е.}/10 \text{ пк}) = -26.73 + 5 \lg(2062650) = 4.84$ . Если учесть, что  $1/p = r(\text{пк})$  ( $p$  - параллакс звезды), то абсолютную зв. величину можно определить выражением

$$M = 5 \lg(r/10 \text{ пк}) + A(\lambda) = m + 5 \lg(p) + 5 - A(\lambda). \quad (3.3)$$

Зная абсолютную зв. величину, легко определить светимость звезды. Светимость определяется или в абсолютных величинах (эрг/с), или в относительных (за единицу берется светимость Солнца ( $L_{\odot} = 3.86 \cdot 10^{33}$  эрг/с)).

### 3.3. Соотношение масса – светимость

Соотношение масса – светимость исследовалось Койпером Дж. В 1938 г. Эта зависимость хорошо представляется формулой

$$\text{Lg}(L/L_{\square}) = 3.5 \text{Lg}(M/M_{\square}).$$

в интервале  $-0.4 < \text{Lg}(M/M_{\odot}) < 1.4$ . Для всех остальных масс с меньшей точностью [3]

$$\text{Lg}(L/L_{\square}) = 3 \text{Lg}(M/M_{\square}).$$

Более точно [7]

$$\text{Lg}(L/L_{\square})=3.876\text{Lg}(M/M_{\square})-0.054, \text{ при } -8^{\text{m}} < M_b < 10.5^{\text{m}};$$

$$\text{Lg}(L/L_{\square})=3\text{Lg}(M/M_{\square})+1.26, \quad \text{при } -12^{\text{m}} < M_b < -7^{\text{m}}.$$

Для самых массивных звёзд

$$\text{Lg}(L/L_{\square})=2.7\text{Lg}(M/M_{\square}).$$

### 3.4 Звезды самой высокой светимости в галактике

К. де Ягер [7] отмечает 3 звезды наибольшей светимости в нашей галактики. Все звёзды находятся в комплексе туманностей  $\eta$  Car (со-звездие Киль).

1) HD 93129 A:

$$\text{Lg}(L/L_{\square})=6,5, T_e \approx 52\,000\text{ K}, M/M_{\square} > 120, R \approx 20 R_{\square}.$$

2)  $\eta$  Car – загадочный объект с интересной историей. До 1837 г. его блеск оценивался величиной  $2^{\text{m}} \div 4^{\text{m}}$ . Затем блеск возрос до значений  $1^{\text{m}} \div 0^{\text{m}}$  и оставался таким на протяжении 20 лет, после чего начал быстро ослабевать до уровня  $7^{\text{m}} \div 8^{\text{m}}$ . Сейчас блеск медленно возрастает и составляет  $6^{\text{m}}$ . Этот объект погружен в протяженную туманность Киль с угловым размером  $\sim 0.3^{\circ}$ , или с линейным размером  $8 \div 15$  пк, учитывая, что расстояние до  $\eta$  Car  $\sim 1.5 \div 3$  кпс. Полная светимость  $L \sim 10^{40}$  эрг/с. Эффективная температура оценивается величиной  $\sim 29000$  К. Такой температуре и светимости соответствует радиус 44 мл. км. Из соотношения масса – светимость масса объекта оценивается как  $115 M_{\odot}$ . Газовая оболочка объекта расширяется со скоростью  $200 \div 700$  км/с Темп потери масс:  $\sim 2 \cdot 10^{-2} \div 8 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$  в год.

3) HD 93250:

$$\text{Lg}(L/L_{\square})=6,4, T_e \approx 52\,000\text{ K}, M \approx 120 M_{\square}, R \approx 19 R_{\square}.$$

Низкий темп потери масс:  $\sim 2 \cdot 10^{-7} M_{\odot}$  в год.

Информация К. де Ягера относится к 1980 г. с тех пор ситуация изменилась. Наблюдения с телескопа Хаббла в инфракрасном диапазоне позволили в 1997 г. увидеть звезду Pistol Star, темпы излучения которой в 10 миллионов раз превосходят светимость Солнца.

### 3.5 Классификация звезд

Излучение звёзд определяется их массой, размерами, температурой фотосферы. Диапазон изменения этих параметров:  $0.08 < M/M_{\odot} < 100$ . Минимальными размерами  $\sim 10$  км обладают пульсары (нейтронные звёзды). Размеры сверхгигантов могут достигать  $700 R_{\odot}$  ( $\alpha$  Sco, Антарес),  $600 R_{\odot}$  ( $\alpha$  Ori, Беллетрикс).

Температуры звёзд главной последовательности изменяются в интервале 2500 – 40000 К. Однако следует учитывать, что спектр звезд может сильно отличаться от теплового. Возможны ситуации, когда отдельным участкам спектра может соответствовать температура, превосходящая 1000000 К. Звезды, находящиеся внутри планетарных туманностей, могут иметь очень высокую температуру ( $> 100000$  К).

Непосредственно массы звезд могут оцениваться у двойных систем. Точность определения размеров и эффективной температуры определяется точностью измерения угловых размеров звезды и её параллакса. Число звезд, физические параметры которых доступны непосредственному измерению, весьма ограничено. Поэтому для определения физических свойств в астрофизике постоянно ищутся и разрабатываются специальные методы. В основе большинства из них лежит анализ спектра излучения звезд. Спектр несет отпечаток физических условий и химического состава вещества, формирующего излучение.

Различие спектров звёзд определяется формой их непрерывного спектра, но более детальную информацию несут спектральные линии, их количество, интенсивность, форма и расположение. Эмпирически спектры большинства звёзд удалось расположить в последовательность, вдоль которой линии одних химических элементов ослабевают, а других усиливаются. Эта классификация появилась в конце 19-го века в Гарвардской обсерватории.

### 3.6 Пионеры классификации

*Йозефа Фраунгофера* (1787-1826) заслуженно называют отцом астрофизики за его пионерские работы в спектроскопии Солнца, звезд и планет. Он обнаружил в солнечном свете линии поглощения, которые впоследствии были названы Фраунгоферовыми линиями. Справедливости ради, следует отметить, что впервые линии поглощения наблюдались в 1802 г. У. Волластоном, чрезвычайно разносторонним учёным. Дипломированный доктор медицины (1793), сферой научных интересов, которого была оптика, электричество, астрономия, химия, минералогия, кристаллография, ботаника. Фраунгофер же достаточно детально описал линии поглощения в спектре Солнца, Физическая интерпретация этих линий была дана позже (в 1860 г.) Г. Кирхгофом. Фраунгофер впервые наметил деление звездных спектров на три класса. Он ввел в практику наблюдений объективную призму, что в дальнейшем позволило составить каталог звёзд Генри Дрэпера, включающий в себя около 400 000 звёзд.

После Кирхгофа серьезная попытка классифицировать спектры звезд была предпринята итальянским астрономом *Анджело Секки* (1818-1878). Он изучил около 4000 спектров звезд и разделил их на четыре основных типа (1863-1868). Классификация Секки использовалась до введения Гарвардской классификации.

Спектральная классификация звёзд была бы невозможна без фотографии. Первая фотография спектра звёзд, на которой были видны линии поглощения, была сделана в 1872 г. *Генри Дрэпером* (1837-1882). По окончании Нью-Йоркского университета Дрэпер получил специальность врача, однако его увлечением была астрономия. Он сам шлифовал зеркала для своих телескопов. Фотографировал поверхности Луны, Солнца, спектры ярких звёзд, туманности Ориона, Солнца, Луны, Марса, Юпитера. В Гарвардской обсерватории после смерти Дрэпера был создан фонд его имени. Гарвардский каталог спектров звезд носит имя Генри Дрэпером (HD каталог).

В 1886 г. в память Генри Дрэпера в Гарвардской обсерватории под руководством её директора *Э. Пикеринга* (1846-1919) началась работа по созданию каталогов спектров звезд. Использование объективной призмы позволяло наблюдателям Гарвардской обсерватории на одной пластине фиксировать спектры большого числа звезд. Первый каталог звездных спектров был издан в 1890 г., он содержал 10351 спектр звёзд северного полушария. При создании каталога

использовалась классификации Секки с увеличением числа спектральных типов с четырех до 16.

Спектральная классификация, которая использовалась при составлении следующих каталогов HD, была предложена и детально разработана Энни Джамп Кэннон (1863-1941). Эта классификация с незначительной модернизацией используется в астрономии до сих пор. За свою работу Кэннон была признана почетным членом Лондонского королевского астрономического общества (1914), зачислена в почетные доктора многих европейских университетов. Однако на родине продвижением по службе её не особенно баловали. В 1911-м была попытка провести её в штат действительных сотрудников Гарварда (faculty member), но эта попытка провалилась. Мужчины профессора не желали ломать традицию. Лишь в 1936 в возрасте 73 г. она была зачислена в постоянные сотрудники Гарварда. Дрейперовский каталог, опубликованный в 1918-1924 гг. (с последующими томами, выходящими вплоть до 1949 г.) содержит 359082 звезды. Спектры большинства из этих звезд классифицированы Кэннон.

### 3.7 Спектральные классы

В настоящее время используется следующая последовательность спектральных классов

Q	R	N	(побочный ряд R)
P – W—O—B—A—F—G—K—M			(основной ряд)
	S		(побочный ряд S)

99% всех видимых ярких звёзд принадлежат классам основного ряда от В до М, остальные классы сравнительно малочисленны.

Q – Новые.

P – Планетарные туманности.

W – Звёзды Вольфа-Райе. Спектры с широкими эмиссионными линиями  $\text{He}^+$ , He и N (или C и O). Цвет – голубой.

O –  $T=28 \div 40$  тыс. К Линии H, He,  $\text{He}^+$ , многократно ионизованные Si, C, N, O (SiIV, CIV, CIII, NIII и др.). Цвет – голубоватый.

B –  $T=10 \div 28$  тыс. К Линии поглощения H и He усиливаются к классу A. Появляются слабые линии CaII. Цвет – белый с голубоватым оттенком.

A –  $T=7\div 10$  тыс. К Линии поглощения H интенсивны. Линии CaII усиливаются к классу F. Появляются слабые линии металлов (Fe, Mg). Цвет – белый.

F –  $T=6\div 7$  тыс.К. Цвет – желтовато-белый.

G –  $T=5\div 6$  тыс. К. Цвет – желтый.

K –  $T=3.5\div 5$  тыс. К Цвет – оранжевый.

M –  $T=2.5\div 3.5$  тыс. К Сильные полосы поглощений молекулярных соединений (TiO). Цвет – красный.

R, N – Полосы поглощений C2, CO, CN (вместо TiO).  $T\sim 2.5$  тыс. К. Цвет – красный

S – Полосы поглощений ZrO.  $T\sim 2.5$  тыс. К Цвет – красный.

Каждый класс делится на 10 подклассов, обозначаемые арабскими цифрами от 0 до 9. Например: G2. Класс O первоначально начинался с O5, однако впоследствии были обнаружены звёзды более раннего подкласса O3.

Однако оказалось, что для полной классификации звезд одного параметра (спектрального класса) недостаточно и был введен *класс светимости*, для обозначения которого используются римские цифры от I до VII: I – сверхгиганты, II – яркие гиганты, III – гиганты, IV – субгиганты, V – карлики, VI – субкарлики, VII – белые карлики.

Солнце по этой двойной классификации принадлежит к G2V.

### 3.8 Диаграмма Герцшпрунга-Рессела

Название Г.- Р. д. связано с именами дат. астронома Э. Герцшпрунга и амер. астронома Г. Ресселла. Герцшпрунг построил первую диаграмму видимая звёздная величина - показатель цвета для звёздного скопления; Ресселл опубликовал в 1914 г. первую диаграмму спектр. класс - абс. звёздная величина.

Г.- Р. д. отражает статистическую зависимость спектр. класса с абс. звёздная величиной. Подавляющее большинство звёзд расположено на главной последовательности. Развитие ядерной астрофизики позволило использовать эту диаграмму при описании эволюции звезд.

Ниже на рис.1 приведена диаграмма Герцшпрунга-Рессела, позаимствованная с Сайта (<http://www.astronet.ru/db/msg/1191489>).



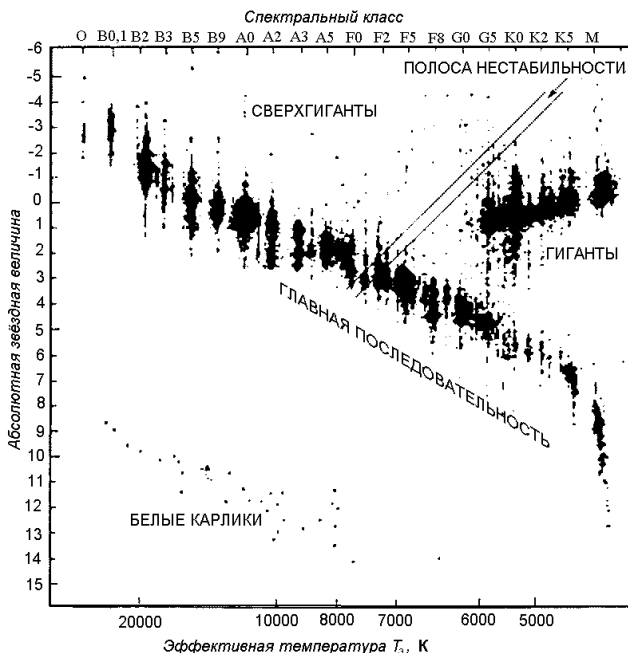


Рис. 1 Положение на диаграмме Герцшпрунга-Ресселла звёзд с известными расстояниями.

### 3.9 Кратные звёзды

Звёзды различаются не только спектральными классами и классами светимости, но также характером: спокойные и переменные. Кроме того, одни предпочитают жить без соседей (одиночные), другие парами или большими семьями.

Двойные звёзды можно разделить на три группы: *визуально двойные*, *затменные* и *спектрально-двойные* звёзды. Звёзды Мицар и Алькор в созвездии Большой медведицы известны как двойные с давних пор. Но оказалось, что и Мицар является двойной звездой. Впервые это обнаружил с помощью телескопа более 300 лет Риччоли Джованни Батиста (1598-1671). Таким образом, система Мицар-Алькор включает в себя не менее трёх звезд. Систематическую охоту за двойными звёздами в конце XVIII начал Вильям Гершель. Он

показал, что большинство двойных звёзд являются связанными системами, а не просто звёздами, волею случая расположенными на одном луче зрения. В начале XIX века его работа была продолжена В.Я. Струве.

Первый каталог двойных звёзд был опубликован Бёрнхэмом в 1906 г. Поиск двойных Бёрнхэм начал, будучи секретарём суда в Чикаго. Первые двойные он обнаружил 6-и дюймовым рефрактором, установленным во дворе его дома. Затем получил доступ к некоторым лучшим телескопам США. Его каталог содержал 13 665 пар звёзд. Современный каталог визуально двойных «The Washington Visual Double Star Catalog» (WDS), основанный на 585261 наблюдениях, содержит 98084 звёздных систем. Этот каталог постоянно пополняется.

*Затменно-двойные* звезды обнаруживаются по периодически изменяющемуся блеску звезды. Джон Гудрайк (1764-1786) первым предположил, что изменение блеска звезды Алголь определяется затенением основной звезды звездой-спутником. Он всего лишь на 4 минуты ошибся в определении периода изменения блеска Алголя (2 дня 20 ч. 45 мин.; 2 дня 20 ч. 49 мин, 9 с – современные данные). Теория изменения блеска затменно-двойных была предложена в 1911 г. С.Н. Блажко и независимо разработана Расселом и Шепли в 1912 г. В кривых блеска затменно-двойных наблюдается два минимума. Самый глубокий минимум наблюдается, когда более холодная звезда закрывает более горячую, а второй минимум приходится на момент затмения холодного компонента горячим.

*Спектрально-двойные.* Звезда Мицар оказалась не только визуально двойной, но и спектрально-двойной. Возможность обнаружения двойных систем по их спектру впервые продемонстрировал Пикеринг. В 1889 г. просматривая спектры более яркой компоненты Мицара, он обнаружил периодическое изменение линейчатого спектра: то линии двойные, а то одиночные. Подобное поведение спектра он объяснил наличием эффекта Доплера. Когда обе компоненты движутся перпендикулярно лучу зрения, доплеровское смещение отсутствует, и в спектрах наблюдаются одиночные линии. Тогда же, когда одна из компонент удаляется от наблюдателя, а другая приближается, происходит расщепление линий в спектре общего излучения звёзд.

Справедливости ради, следует сказать, что первым в 1888 г. начал исследование лучевых скоростей звёзд немецкий астроном Герман Карл Фогель (1841-1907). Он обнаружил периодическое из-

менение лучевой скорости Алголя. Однако из-за слабой светимости второго компонента его излучение не было видно на фоне более яркой звезды, поэтому расщепление линий не наблюдалось. Линии оставались одиночными, но претерпевали смещение за счет периодического изменения лучевой скорости яркой компоненты Алголя.

В 1922 г. Дж. С. Пласскетт (1865-1941) обнаружил чрезвычайно массивную двойную систему, которая впоследствии была названа звездой Пласскетта. Масса каждой из компонент близка к  $70 M_{\odot}$ . Спектр этой звезды не поддается простой интерпретации. Так лучевые скорости движения центра масс, оцененные отдельно по спектру каждой из компонент двойной системы, оказались различными: +25 км/с и -75 км/с. По всей видимости, в этой системе существует интенсивный звёздный ветер, искажающий спектр излучения.

*X-ray binaries.* Когда одним из партнёров двойной системы является компактный объект (белый карлик, нейтронная звезда), то система становится рентгеновской двойной. При падении вещества нормальной звезды на аккреционный диск компактного объекта происходит нагрев вещества до столь высоких температур, что оно начинает испускать X-лучи.

*Определение масс.* Двойные звёзды предоставляют возможность оценивать их общую массу, используя третий закон Кеплера. Согласно этому закону куб большей полуоси  $a$  эллипса относительного движения тел  $(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$  пропорционален квадрату периода обращения тел  $T$  относительно центра масс. Закон Кеплера следует из решения задачи двух тел (Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Механика), согласно которому

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(m_1 + m_2)}.$$

Если период измерять в годах, длину в а. е., а массу в солнечных массах, то это выражение принимает вид

$$T^2 = \frac{a^3}{m_1 + m_2}.$$

Применим это выражение для оценки масс двойной Сириуса, период которой  $T=49,94$  г. Большая полуось определяется выражением

$a=\theta/p$  (где  $\theta=7'',62$  – угловой размер полуоси,  $p=0'',375$  – параллакс Сириуса). Подставляя эти значения в вышестоящее выражение, получаем  $m_A+m_B=3.36$ , что совпадает с данными справочника [3]. Здесь  $m_A=2.35$  и  $m_B=0.99$ . Звезда Сириус В является белым карликом спектрального класса A5, радиус которого равен  $0.022 R_\odot$ . Сириус А принадлежит спектральному классу A0, его радиус  $R=1,8 R_\odot$ . Абсолютные величины звёзд следующие:  $M_A=1^m,5$  и  $M_B=11^m,4$ , т.о. отношение светимостей этих компонент  $L_A/L_B=10^{3.96}\sim 9120$ .

Если поддаётся измерению положение каждой из двух компонент, то можно оценить не только суммарную массу, но и массу каждого из партнёров, используя соотношения

$$\mathbf{r}_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{r}, \mathbf{r}_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} \mathbf{r}, \mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2.$$

*Происхождение двойных звезд.* Поначалу считалось, что двойные звёзды происходят в результате деления быстро вращающихся одиночных звезд. Но в последующем от этой гипотезы отказались в пользу теории происхождения звёзд из газопылевого облака. При достаточной массе и плотности облака в нём одновременно могут рождаться гравитационно-связанные звёзды. Однако и это мнение не имеет строгого теоретического обоснования.

*Частота встречаемости.* Из 30 ближайших звёзд 13 являются кратными и содержат 29 компонент [6]. Т.о. доля кратных  $29/46\sim 0.63$ . Из 30 самых ярких звёзд 15 являются кратными и содержат 41 компоненту, доля кратных  $41/56\sim 0.73$ . Следовательно, можно признать, что кратные звёзды представляют более половины звёздного населения.

### 3.10. Звёздные скопления и ассоциации

Кроме одиночных звёзд, как наше Солнце, в Галактике имеются системы из двух, трех и более звезд. Объекты, число звёзд в которых исчисляется сотнями или тысячами – называются звездными скоплениями. Звёздные скопления делятся на две основные группы: *рассеянные и шаровые*.

*Населения:* В 40-х годах прошлого века В. Бааде ввёл в обиход астрономов понятие «звёздные населения». Согласно этому понятию звёзды разделяются на два типа населений.

К *первому типу населения* принадлежат звёзды диска Галактики. Они участвуют в общем вращательном движении вокруг центра Галактики. Дисперсии скоростей этих звёзд относительно средней скорости небольшая  $\sim 10\text{--}15$  км/с, тогда как средняя скорость на расстоянии  $\sim 10$  кпс от центра Г (как у Солнца)  $\sim 250$  км/с. Спектры богаты линиями металлов. Области, где встречаются звезды нас I, богаты газом и пылью.

Звёзды гало Галактики принадлежат *второму типу населения*. Они практически не участвуют в общем вращательном движении вокруг центра Галактики. Дисперсии скоростей этих звёзд большая  $\sim 75$  км/с. Спектры бедны линиями металлов. Области, где встречаются звёзды нас II, бедны газом и пылью.

*Рассеянные звездные скопления* встречаются вблизи галактической плоскости. Принадлежат к населению I типа. Имеют общее происхождение, а соответственно и одинаковый возраст. Сейчас известно более 1200 рассеянных скоплений, из них детально изучено 500. Самые известные среди них – *Плеяды* и *Гиады* в созвездии Тельца. Общее количество рассеянных скоплений в Галактике, возможно, достигает ста тысяч.

Рассеянные скопления состоят из сотен или тысяч звезд. Их масса невелика ( $100\text{--}1000 M_{\odot}$ ), и гравитационное поле не может долго сдерживать их в малом объеме пространства, поэтому за миллиарды лет рассеянные скопления распадаются. Среди рассеянных звездных скоплений гораздо больше молодых звезд, чем старых. Все звезды, входящие в состав скопления, имеют общее движение. Возраст скоплений определяется по их диаграммам Герцшпрунга-Рассела согласно выражению

$$t = 0.7 \cdot 10^{10} \frac{M_x L_{\square}}{M_{\square} L_x}.$$

Здесь  $M_x$  и  $L_x$  масса и светимость звезды скопления, которая находится в месте пересечения диаграммы Герцшпрунга-Рассела скопления с главной последовательностью.

Если воспользоваться соотношением масса-светимость для главной последовательности  $Lg(L/L_{\odot})=3Lg(M/M_{\odot})$ , то получим

$$t = 0.7 \cdot 10^{10} \left( \frac{M_{\square}}{M_x} \right)^2.$$

В двадцатых годах XX века Харлоу Шепли исследовал рассеянные скопления и произвел классификацию звезд. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела для семи рассеянных скоплений показала, что практически все их звезды лежат на главной последовательности. Средние размеры рассеянных скоплений от 2 до 20 парсеков. Большинство рассеянных скоплений расположено в диске нашей Галактике, где сконцентрированы скопления пыли и межзвездного газа, в спиральных рукавах.

*Шаровые скопления* сильно выделяются на звездном фоне благодаря значительному числу звезд и четкой сферической форме. Диаметр шаровых скоплений составляет от 20 до 100 пк, а масса –  $10^4$ – $10^6 M_{\odot}$ . Вся сфера шарового скопления густо заполнена звездами, их концентрация растет к центру. Сейчас известно свыше 150 скоплений; предполагается, что в нашей Галактике их не больше нескольких сотен. В шаровых скоплениях двойные звезды встречаются редко.

Шаровые скопления – старейшие образования в нашей Галактике, их возраст от 10 до 15 миллиардов лет и сравним с возрастом Вселенной. Бедный химический состав и вытянутые орбиты, по которым они движутся в Галактике, говорят о том, что шаровые скопления образовались в эпоху формирования самой Галактики.

Помимо рассеянных звездных скоплений хорошо изучен еще один тип группировок молодых звезд – *звездные ассоциации*. Это понятие было введено в обиход астрономов В.А. Амбарцумяном в 1947-м. Ассоциация – это группа молодых ярких звезд, которая не связана в скопление гравитационными силами. Но направление их скорости указывает, что они движутся из одной области. Учитывая расстояние между звездами ассоциации и скорость их движения, Амбарцумян делает вывод, что возраст этих звезд не превышает нескольких миллионов лет и что они могли возникнуть лишь в результате деления компактного массивного образования, а не путем кон-

денсации газопылевого облака, как считают большинство астрофизиков.

*ОВ-ассоциации* имеют протяженность от 15 до 300 пк и содержат от нескольких десятков до нескольких сотен горячих голубых гигантов и сверхгигантов. Поскольку гиганты ранних спектральных классов быстро проходят путь эволюции, то все звезды образовались в одно время и имеют небольшой возраст.

*Т-ассоциации* содержат переменные звезды типа Т Тельца, которые еще не достигли главной последовательности и находятся на самых ранних этапах звездной эволюции. В таких ассоциациях открыты источники инфракрасного излучения, связанные с рождающимися массивными звездами.

## 4. Галактики

### 4.1. Наша Галактика

Галактика содержит две основных подсистемы, вложенные одна в другую и гравитационно-связанные друг с другом. Первая называется сферической – *гало*, ее звезды концентрируются к центру галактики, а плотность вещества, высокая в центре галактики, довольно быстро падает с удалением от него. Центральная, наиболее плотная часть гало в пределах нескольких тысяч световых лет от центра Галактики называется *балдж*. Вторая подсистема – это массивный *звездный диск*. Он представляет собой как бы две сложенные краями тарелки. В диске концентрация звезд значительно больше, чем в гало. Звезды внутри диска движутся по круговым траекториям вокруг центра Галактики. В звездном диске между спиральными рукавами расположено Солнце.

Звезды галактического диска относятся к *населению I типа*, звезды гало – к *населению II типа*. Звезды плоской составляющей по сравнению со звездами сферической составляющей отличаются большим содержанием тяжелых элементов. Возраст населения сферической составляющей превышает 12 миллиардов лет. Его обычно принимают за возраст самой Галактики.

По сравнению с гало диск вращается заметно быстрее. Скорость вращения диска не одинакова на различных расстояниях от центра. Масса диска оценивается в 150 миллиардов  $M_{\odot}$ . В диске находятся

спиральные ветви (рукава). Молодые звезды и очаги звездообразования расположены, в основном, вдоль рукавов. Диск и окружающее его гало погружены в *корону*. В настоящее время считают, что размеры короны Галактики в 10 раз больше, чем размеры диска.

## 4.2. Классификация галактик

В начале прошлого века уже сложилось общее представление об устройстве нашей галактики. Однако существовали объекты, принадлежность которых к нашей галактике вызывала сомнение. К таким объектам относились туманности, которые при том уровне техники не разделялись на звёзды. В 1774 году французский астроном Шарль Мессье составил первый *каталог* из 45 туманных объектов, доступных для наблюдений на инструментах того времени. В 1781 вышел второй каталог, содержащий 103 объекта. Современный каталог содержит 110 объектов. Только 11 объектов из этого каталога оказались газовыми туманностями, остальные – шаровыми и рассеянными скоплениями и галактиками. (URL адрес изображений объектов каталога <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/index.html>).

Однако понимание, что некоторые из туманностей Мессье являются галактиками, пришло не сразу. В 1920 г. в Вашингтоне между американскими астрономами Х. Шепли и Г. Кертисом происходила дискуссия (известная как «великий диспут»). Кертис утверждал, что спиральные туманности находятся далеко за пределами Млечного пути и сами представляют собой галактики. В 1918 он оценил расстояние до туманности Андромеды в 500000 св. лет. (Согласно современным данным 2,2 мл. св. лет). Шепли же считал, что туманности принадлежат нашей галактике и находятся на её периферии.

По иронии судьбы ученик Шепли Э. Хаббл уже в 1924 г подтвердил справедливость позиции оппонента своего учителя. Он показал, что наша галактика не одинокая, и что существует много других галактик, различающихся друг от друга как по форме, размерам, светимости. Многочисленные наблюдения позволили Хабблу разделить галактики на эллиптические (E), спиральные (S) (две ветви) и неправильные (Ir). К неправильным галактикам относятся наши ближайшие соседи Большое и Малое Магеллановы Облака.

Галактики распределены в пространстве неравномерно. Наша галактика вместе с ближайшими соседями образует местную группу. Согласно [3], местная группа насчитывает 16 галактик. Кроме местной группы существуют и другие скопления галактик. Среднее чис-



ло галактик в скоплении  $\sim 200$ , средний диаметр 1.6 Мпс. К этим данным следует относиться осторожно, поскольку они основаны на наземных наблюдениях 50-и летней давности.

### 4.3. Лацертиды, сейфертовские галактики, радиогалактики, квазары

*Лацертиды* – немногочисленная группа галактик с активными ядрами. Впервые один из представителей этой группы BL Lacertae наблюдался в 1929 г. немецким астрономом К. Хофмейстером в созвездии Ящерицы (Lacertae). Первоначально этот объект был отнесен к переменным звёздам. Красное смещение BL Lacertae 0,07, что соответствует расстоянию 280 Мпк. У лацертид оптические спектры, как правило, являются непрерывными, поэтому обнаружение красного смещения весьма затруднено. Блеск лацертид изменяется в широких пределах. Излучение лацертид сильно поляризовано (до 30–40 %), а это указывает на присутствие магнитного поля. Лацертиды подобно квазарам окружены туманными оболочками. Характерное время переменности составляет недели и месяцы.

*Сейферт К.* в 1943 г. сделал сообщение об обнаружении галактик с необычными свойствами. В спектрах этих галактик присутствовали яркие и очень широкие эмиссионные линии. Дисперсия скорости движения, обеспечивающего столь значительное расширение линий, составляла тысячи, а порой десятки тысяч км/с. Эти галактики имели очень яркое и компактное ядро. Сейферт обнаружил 12 галактик с подобными свойствами.

Понятие «*радиогалактика*» появилось в 50-х годах прошлого столетия в результате отождествления источников радиоизлучения с оптически слабыми галактиками. Выделение радиогалактик в отдельный класс галактик носит условный характер, поскольку все галактики в той или иной степени излучают в радиодиапазоне. Мощность излучения варьируется в диапазоне от  $10^{37}$  до  $10^{44}$  эрг/с. К радиогалактикам принято относить галактики с мощностью радиоизлучения  $10^{42}$ –  $10^{44}$  эрг/с, которая сравнима с мощностью излучения в оптическом диапазоне. Тогда как у нормальных галактик интенсивность радиоизлучения существенно ниже оптической.

Радиоизлучение характерно для гигантских эллиптических галактик ( $10^{12}$ – $10^{13}$   $M_{\odot}$ ). Наиболее мощными радиоисточниками являются *E* галактики с протяженными оптическими оболочками (коро-

нами). Они называются *D*-галактиками. Промежуточный между *D* и *E* тип галактик обозначается *DE*. Кроме того, для радиогалактик, диски которых разделены газопылевым слоем, используется обозначение *DB*-галактики.

Излучение поляризовано, что указывает на наличие магнитного поля. Спектр степенной. Область излучения обычно состоит из двух компонент, расположенных по разные стороны от центрального оптического объекта. Типичное расстояние до центрального объекта 10-100 Кпс. Бывают и гигантские расстояния 2-5 Мпк. Наиболее изучены РГ Лебедь А, Кентавр А и Дева А.

*Лебедь А.* В 1951 г. отождествлен с *E* галактикой (*DB* радиогалактика).  $Z=0.057$  (171 Мпк).  $m=16^m$ ,  $M_{\text{abs}}=-22.2$ ,  $L=1.2 \cdot 10^{45}$  эрг/с (в полосе 30 м - 3 см). Оптическое ядро разделено на две половины газовой-пылевым слоем. Галактика вращается. Радиоисточники расположены вдоль оси вращения по разные стороны от оптического ядра на расстоянии 40 кпс и удаляются от него со скоростью 0.02 с.

*Кентавр А* (NGC 5128). Тип *E+S*.  $m=7.9^m$ ,  $L=2.7 \cdot 10^{40}$  эрг/с,  $M_{\text{abs}}=-20.7^m$ , расстояние 4 Мпк. В оптическом изображении четко просматривается газово-пылевой диск. Общая протяженность радиоисточника вдоль большой оси достигает 500 кпс. Кроме протяженных источников вблизи центра обнаружены два компактных радиоисточника, разнесённые на 12 кпс

*Дева А.* (*M* 87, NGC 4486) Тип *E*.  $m=9.6^m$ ,  $M_{\text{abs}}=-20.6$ ,  $L=6.5 \cdot 10^{40}$  эрг/с, расстояние 12,2 Мпк. Имеет два сравнительно компактных радиоисточника, один джет и протяженный источник низкой поверхностной яркости.

В 1959 г. был опубликован 3-й Кембриджский каталог (3С), содержащий 417 радиоисточников. Следующий шаг состоял в отождествлении радиоисточников с оптическими объектами. К 1970 было отождествлено лишь 200 радиоисточников.

*Квазары.* В 1960 г. Были открыты источники радиоизлучения с малыми угловыми размерами ( $<10''$ ), которые были отождествлены с оптическими источниками, имеющими звёздную величину  $\sim 16^m$ - $18^m$ . В 1963 г. М. Шмидт расшифровал спектр оптического партнёра одного из самых ярких радиоисточников Кембриджского каталога 3С 273. Но прежде необходимо было установить местоположение оптического партнёра. В решении этой задачи большую услугу оказала Луна. В 1962 г. она трижды затмевала радиоисточник 3С 273, наблюдения за которым велось на австралийском радиотелескопе (65 м). По положению кромки лимба луны удалось определить ко-

ординаты объекта с точностью до 1". Объект состоял из двух компонент: вытянутого *A* и точечного *B*, который имел визуальную звездную 12,7<sup>m</sup>, а положение эмиссионных линий соответствовало красному смещению  $z=0,158$ . Соответствующая смещению радиальная скорость  $\sim 48000$  км/с. Подобную скорость можно интерпретировать лишь космологическим расширением Вселенной. Согласно закону Хаббла этому смещению соответствует расстояние до объекта 630 Мпк. Если не учитывать поглощения, то объект должен иметь абсолютную величину  $=-22,8^m$  и полную светимость  $L=10^{11}L_{\odot}=4 \cdot 10^{44}$  эрг/с. Учёт поглощения лишь увеличит эту величину.

Пример распределения энергии по диапазонам от галактик, радиогалактик, сейфертовских галактик и квазаров приведен ниже в таблице.

Диапазоны	Рентгеновский	Оптический	Радио
Галактика	1	1	1
Радиогалактика	100-5 000	2	2 000-2 000 000
Сейфертовская галактика	300-70 000	2	20-2 000 000
Квазар 3C273	2 500 000	250	6 000 000

## 5. Ядерная астрофизика

### 5.1. Теорема вириала

Первые попытки построения звёздных моделей были предприняты в начале прошлого столетия. Для получения некоторых оценок нам понадобится теорема вириала, которая была доказана Р. Клаузиусом в 1870 г. Согласно этой теореме средняя кинетическая энергия системы частиц, движущихся в ограниченном объёме, может быть оценена выражением

$$K = -0.5 \sum \langle \mathbf{r}_i \mathbf{F}_i \rangle,$$

где  $\mathbf{r}_i$  и  $\mathbf{F}_i$  радиус-вектор частицы и действующая на неё сила.

Солнце каждую секунду излучает  $\sim 4 \cdot 10^{33}$  эрг энергии. Количество тепла, содержащегося в Солнце, можно оценить на основе теоремы вириала

$$Q \sim GM^2 / R \sim 4 \cdot 10^{48} \text{ эрг.}$$

Такое количество энергии Солнце (при современной светимости) теряет за  $10^{15}$  с ( $3 \cdot 10^7$  лет).

Рассмотрим другую задачу. Предположим, что все внутренние источники энергии Солнца выключились, а Солнце продолжает светить за счёт тепловых запасов и гравитационного сжатия. При этом температура поверхности фотосферы остаётся неизменной. Скорость изменения радиуса Солнца в этом случае будет определяться выражением

$$-\frac{dQ}{dt} = -\frac{GM^2}{R^2} \frac{dR}{dt} = L_{\square} \frac{R^2}{R_{\square}^2}.$$

Введением безразмерной величины  $x = R/R_{\odot}$  это выражение можно привести к виду

$$\frac{1}{x^4} \frac{dx}{dt} = \frac{R_{\square} L_{\square}}{GM_{\square}} \cong 10^{-15} \text{ с}^{-1}.$$

Решение уравнения следующее

$$x = \left( 1 + 3 \frac{R_{\square} L_{\square}}{GM_{\square}} t \right)^{-1/3} \cong (1 + 3 \cdot 10^{-15} t)^{-1/3}.$$

Т.о., если бы источники энергии излучения Солнца выключились, то через 100 миллионов лет радиус Солнца уменьшился бы вдвое. Причём начальная скорость уменьшения радиуса составляла бы 20 метров в год. Однако ничего подобного с Солнцем не происходит – гравитационное сжатие не наблюдается. Следовательно, излучение Солнца имеет другие источники энергии.

Идея о гравитационном сжатии, как источнике энергии излучения звезд и Солнца, принадлежала Гельмгольцу и Кельвину. Были и другие идеи. Например, Локьер Джозеф Норманн полагал, что роль такого источника могут играть падающие на Солнце метеориты. В настоящее время общепринято считать, что энергия излучения звезд возникает в результате термоядерных реакций, происходящих в недрах звёзд. Эта точка зрения в состоянии объяснить время жизни и разнообразие звёздного населения.

## 5.2. Источники энергии излучения звезд

Для любой системы любой процесс выделения энергии сопровождается переходом этой системы в более низкое энергетическое состояние, а значит и уменьшением полной массы системы. Эффективность процесса энерговыделения определяется возникающим при этом дефекте масс. Например, у химических реакций дефект масс  $\sim 10^{-10}$  общей доли вещества, участвующего в реакции. Эта доля у термоядерного синтеза может достигать 0.007. Эффективность энергии гравитационного сжатия у звезды типа Солнца  $\sim 4 \cdot 10^{-6}$ . У компактных объектов, таких как нейтронные звезды, эффективность гравитационного сжатия может достигать десятков процентов. Все же для большинства звезд основной претендент на роль источника энергии их излучения является термоядерный синтез.

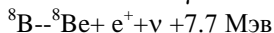
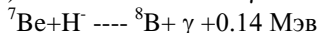
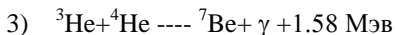
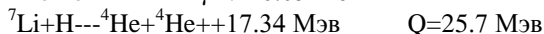
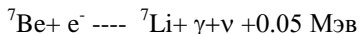
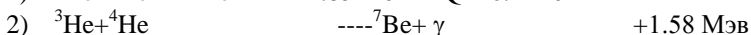
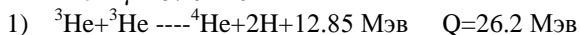
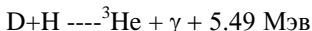
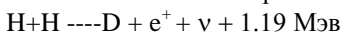
Однако для возникновения реакций термоядерного синтеза требуются определенные условия. Первым, предложившим гипотезу термоядерного синтеза в качестве источника энергии излучения Солнца, был А. Эддингтон. В 1926 г. им была опубликована книга «Внутреннее строение звезд», где он оценил давление и температуру внутри звезды, обеспечивающие динамическое равновесие давления и гравитационного сжатия. Эта температура оказалась  $\sim 4 \cdot 10^7$  К. Процесс превращения водорода в гелий мог бы поддерживать такую температуру внутри звезды в течение миллиардов лет. Однако физики возражали Эддингтону. Их доводы сводились к тому, что температура  $\sim 4 \cdot 10^7$  К является очень низкой, чтобы мог начаться процесс слияния ядер водорода. Энергии теплового движения протонов при этой температуре оказывается недостаточно для преодоления барьера электрического отталкивания между протонами.

В это же время интенсивно разрабатывается математический аппарат квантовой механики. Используя этот, аппарат Г. Гамов показал возможность проникновения частиц через барьер туннельным

способом. Работы Эддингтона и Гамова побудила Роберта Аткинсона и Фрица Хоутерманса написать работу под названием «К вопросу о возможности образования элементов в недрах звёзд» (1929 г.). В этой работе авторы показали, что наиболее эффективно преодолевает кулоновский барьер ядер протон. Появление этой работы можно считать началом возникновения ядерной астрофизики.

Ганс Бете (США) и Карл-Фридрих фон Вайцзекер практически одновременно направили в редакции журналов работы посвященные реакции углеродного цикла. В 1967 г. Бете была присуждена Нобелевская премия за открытие углеродного цикла. Реакция углеродного цикла обеспечивает превращение 4-х протонов в ядро гелия. Углерод в этой реакции выступает в качестве катализатора.

Наряду с углеродным циклом синтез гелия может проходить согласно протонно-протонной цепочки. Более того, оценки У. Фаулера [8] показали, что не менее 90% светимости Солнца обеспечивает протонная цепочка. Уточненные оценки подняли планку протонно-протонной цепочки до уровня 99%. Вообще термин «цепочка» не точно отражает суть дела. В действительности существует три канала синтеза гелия. На первом общем для этих каналов этапе образуется изотоп гелия  $^3\text{He}$ . Происходит это следующим образом



Протон-протонная цепочка реализуется в звездах с массой сравнимой и меньше солнечной. В звездах массивнее Солнца энергия выделяется в углеродно-азотном цикле CNO-цикле.

При синтезе гелия из водорода, как в протон-протонном, так и в CNO циклах происходит образование одного ядра гелия из 4-х протонов. Относительный дефект массы (эффективность процесса), возникающий при таком синтезе определяется выражением  $\delta = 1 - m_{\text{He}}/4m_p$ . Если учесть, что термоядерные реакции идут в цен-

тральном ядре, масса которого  $\sim 0.1 M$  звезды, то можно оценить время выгорания ядра по светимости звезды  $L$ :  $T_{\text{я}} = \delta(0.1 M)c^2/L$ .

Учитывая соотношение масса-светимость  $Lg(L/L_{\odot}) = 3.5Lg(M/M_{\odot})$ , в интервале  $-0.4 < Lg(M/M_{\odot}) < 1.4$ , получаем  $T_{\text{я}} \sim 10^{10} (M/M_{\odot})^{-2.5}$  лет.

Для остальных масс  $T_{\text{я}} \sim 10^{10} (M/M_{\odot})^{-2}$  лет. Т.о. массивные звёзды будут быстро сжигать свой водород и уходить с главной последовательности.

### 5.3. Прямая проверка теории - наблюдение солнечных нейтрино

Количество нейтрино  $N_{\nu}$ , излучаемое Солнцем за секунду, определяется только светимостью Солнца, т.к. при выделении 26.7 МэВ рождается 2 нейтрино  $N_{\nu} = 2L_{\odot}/26.7 \text{ MeV} \sim 10^{38}$  нейтрино/с. Однако только «борные» нейтрино (как наиболее энергичные) допускают регистрацию. Эти нейтрино рождаются лишь в третьей  $pp$ -цепочке.

Одной из проблем нейтринной астрономии было определение доли борных нейтронов в общем потоке. На протяжении 40 лет теоретические предсказания и экспериментальные исследования не пришли к согласию. В эксперименте фиксировалось меньше нейтрино, чем предсказывала теория. История исследования солнечного нейтрино описана в статьях одного из ведущих специалистов в этой области Дж. Н. Бакала [8]. Последнее время стала популярна гипотеза осциллирующих нейтрино (эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна). Согласно этой гипотезе электронные нейтрино по пути от Солнца к Земле превращаются в тау или мю-нейтрино. Существует 3 сорта нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино. Т.к. другие нейтрино имеют гораздо меньшие сечения взаимодействия с веществом, чем электронное нейтрино, наблюдаемый дефицит может быть объяснен, не меняя стандартной модели Солнца, построенной на основе всей совокупности астрономических данных.

## 6. Эволюция звезд после главной последовательности

Считается, что звезды рождаются в результате гравитационного сжатия газопылевого облака. Причем в момент рождения они на 70% состоят из водорода, на 30 % из гелия и незначительных приме-

сей других элементов. Превращение легких элементов в более тяжелые (до группы железа) сопровождается выделением энергии. Самым высоким КПД в цепочке этих превращений обладает реакция синтеза гелия из протонов. Светимость звезд, в которых горит водород, из-за относительно низкой температуры синтеза меньше, чем на последующих стадиях эволюции. Поэтому процесс горения водорода является самым длительным и соответствует стадии жизни звезды на главной последовательности. Срок жизни более массивных звезд на главной последовательности короче менее массивных, поскольку  $T_{\pi} \sim 10^{10} (M/M_{\odot})^{-2.5}$  лет.

1)  $0.08 < M/M_{\odot} < 2.5$ . После горения водорода звезда уходит с главной последовательности вправо в область красного гиганта. Снаружи гелиевого ядра горит водородный слоевой источник, оболочка постепенно рассеивается, и остатком эволюции является Не белый карлик с массой  $\sim 0.5 M_{\odot}$ .

2)  $2.5 < M/M_{\odot} < 8$ . После горения водорода и после стадии красного гиганта происходит превращение ядра Не в углерод и кислород. Образуется вырожденное СО-ядро с массой  $< 1.2 M_{\odot}$ . Оболочка сбрасывается с образованием планетарной туманности, светящейся за счет подсветки горячим ядром ( $\sim 10^5$  К), остывающим и превращающимся в холодный СО-белый карлик. Средняя масса таких белых карликов  $0.6-0.7 M_{\odot}$ .

3)  $8 < M/M_{\odot} < 12$ . Цепочка термоядерных реакций доходит до смеси кислорода, неона и магния и останавливается из-за вырождения О-Ne-Mg ядра. Результат эволюции после сброса оболочки – О-Ne-Mg белый карлик с массой вблизи Чандрасекаровского предела.

4)  $12 < M/M_{\odot} < 40$ . Термоядерная эволюция в ядре происходит при невырожденных условиях вплоть до образования элементов железного пика (Fe, Co, Ni). Ядро с массой  $1.5-2 M_{\odot}$  коллапсирует с образованием нейтронной звезды. Процесс сопровождается вспышкой сверхновой типа II (если сохранилась протяженная водородная оболочка) или Ib/c (коллапс ядра, звезды Вольфа-Райе). Сбрасываемая оболочка взаимодействует с межзвездной средой и наблюдается в течение  $\sim 20000$  лет как остаток вспышки сверхновой.



5)  $12 < M/M_{\odot} < 40$ . Возможно, звезды с такими массами коллапсируют с образованием черной дыры с массой около  $M_{\odot}$ .

## 6.1. Белые карлики

История белых карликов начиналась с двух звёзд. В 1910 г. Рассел при личной встрече с Пикерингом поинтересовался спектральным классом одной из ближайших звезд малой светимости 40 Эридана В. Считалось, что такие звёзды должны принадлежать к классу G. В распоряжении Пикеринга были каталоги HD и сотрудники, умеющие этими каталогами пользоваться. Через час миссис Флеминг сообщила, что указанная звезда принадлежит к классу A, т. е. имеет очень высокую температуру поверхности. Учитывая, что звезда имеет малую светимость ( $M_v=11,2^m$ ), она должна иметь малые размеры и, следовательно, большую плотность вещества. В 1914 г. Адамс, обнаружил, что спутник Сириуса (Сириус В) принадлежит к спектральному классу A ( $M_v=11,4^m$ ), а его плотность должна в несколько тысяч раз превосходить плотность Солнца. Астрономам такие оценки показались невероятными. Лишь к 1924 г., благодаря исследованиям Эддингтона эти оценки уже выглядели правдоподобными. Маленькие белые звёзды с большой плотностью стали называться белыми карликами.

В 1926 г. была предложена статистика Ферми-Дирака, а уже в 1928 г. Фаулер применил эту статистику для интерпретации белых карликов. Более строгие расчёты моделей белых карликов были сделаны в 1930 г. Чандрасекаром. Он же доказал существования верхнего предела массы белого карлика.

## 6.2. Предел Чандрасекара

Предел Чандрасекара определяется принципом неопределенности  $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$ .  $\Delta x \approx R \cdot N^{1/3}$  ( $R$ - радиус звезды,  $N$  – число фермионов) отсюда, наименьший импульс, который может иметь частица,  $p_F \sim \hbar N^{1/3}/R$  (импульс Ферми). При большой плотности импульс становится релятивистским  $p_F > mc$ . В этих условиях энергия, приходящаяся на одну частицу, будет пропорциональна  $E \sim p_F c - G N m^2/R \sim \hbar c N^{1/3}/R - G N m^2/R$ , где второй член представляет потенциальную энергию частицы в гравитационном поле.

Если при малых  $R$  и некотором  $N$  функция  $E(R) < 0$ , то она будет монотонно стремиться к 0, оставаясь отрицательной при  $R \rightarrow \infty$ . Подобная звезда будет неустойчивой: Излучая энергию, она будет стремительно уменьшать свои размеры. С другой стороны при малых  $R$  и некотором  $N$ , меньшем, чем в предыдущем случае, функция  $E(R) > 0$ . С увеличением  $R$  кинетическая энергия будет убывать быстрее чем  $1/R$ , поскольку частицы становятся менее релятивистскими. Соответственно будет существовать такое  $R$ , при котором энергия будет принимать отрицательное минимальное значение. Система – устойчива. Граница между устойчивой и неустойчивой системой определяется условием  $N_{\max} \sim (\hbar c / G m^2)^{3/2} \sim 2 \cdot 10^{57} (M_{\max} \sim 1.5 M_{\odot})$ . Эта величина и определяет предел Чандрасекара [9].

## 7. Нестационарные звёзды

### 7.1. Пульсирующие звёзды, цефеиды

Периодические изменения блеска звезд и их спектров не всегда означает, что объект принадлежит кратным системам. Существует класс одиночных пульсирующих звёзд. Еще в 1784 г. Гудрайк обнаружил, что  $\delta$  Цефеи изменяет свой блеск почти на 1 зв. в. с периодом 5.37 суток. Появление спектральных методов исследования звезд внесло свежую струю в исследовании пульсирующих звёзд. Однако началось это с курьёза. В 1894 А.А. Белопольский (1854-1934) обнаружил, что лучевая скорость  $\delta$  Цефеи меняется с тем же периодом, что и светимость. Было сделано предположение, что звезда спектрально-двойная. Однако поиск спектрального партнёра оказался безуспешным. Кроме того, оказалось, что время максимума лучевой скорости почти совпадало с моментом минимума блеска. Если бы блеск определялся затмением, то в момент затмения скорость должна быть перпендикулярна лучу зрения, а, следовательно, лучевая скорость должна равняться лучевой скорости центра масс системы и быть меньше максимальной. Следующий удар по гипотезе двойной звезды нанёс Шварцшильд, показав, что изменение блеска сопровождается изменением температуры.

Разработка теории радиальной пульсации звёзд началась задолго до экспериментального обнаружения вариаций лучевых скоростей

звезд. Ритлер, в 1879 г. на основе простой идеально однородной модели звезды получил соотношение между плотностью и периодом пульсаций, которое с удивительной точностью соответствовало экспериментальным наблюдениям. Однако его идеи не были активно поддержаны другими астрономами до 1914 г., когда Шепли нанес окончательный удар по гипотезе двойных звезд применительно к цефеидам. Он показал, что размеры этих звезд существенно превосходят радиусы орбит, по которым они бы должны двигаться в соответствии с наблюдаемыми лучевыми скоростями.

Основная трудность проблемы пульсирующих звёзд заключалась в объяснении механизма поддержания амплитуды колебаний светимости звезды на одном уровне. Любое колебание должно затухать, если нет соответствующей подкачки энергии. В своей монографии о внутреннем устройстве звезд Эддингтон высказал предположение, что цефеиды черпают эту энергию из термоядерного синтеза. Однако он не мог предложить конкретного механизма генерации пульсаций. Тем не менее, Эддингтон высказал гипотезу, что внутренние слои звезды должны работать подобно клапану, запирая и открывая прохождение энергии из звезды наружу в нужные моменты времени. Эта идея Эддингтона была реализована в 1953 г. С. А. Жевакиным, который показал, что область второй ионизации гелия может играть роль клапана Эддингтона. Позднее в (1958 г.) аналогичный результат был получен Дж. П. Коксом.

Периоды пульсирующих звёзд изменяются в широком диапазоне: от 71 с. Компонента двойной бывшей Новой Геркулеса до 350 суток у долгопериодических цефеид. Между периодом пульсаций  $P$  и средней плотностью звезды  $\rho$  существует связь в виде выражения  $P^2\rho = \text{const}$ .

Цефеиды по их местоположению в галактике делят на две большие группы: цефеиды I типа (классические) располагаются в плоскости галактики, цефеиды II типа (звёзды типа W Девы) принадлежат сферической составляющей галактики. Классические цефеиды считаются молодыми, а цефеиды II типа – старыми.

Кроме указанных 2-х типов цефеид они дополнительно делятся на группы, занимающие различное положение на диаграмме Герцшпрунга-Рессела: классические цефеиды, RR Лиры, Мириды, цефеиды-карлики, W Девы, RV Тельца, долгопериодические цефеиды (с характерными периодами ~175 и ~350 суток).

*Период – светимость.* Самое замечательное и полезное свойство цефеид проявляется в наличии связи «Период – светимость».

Эта связь была обнаружена в 1908 г. сотрудницей Гарвардской обсерватории Х. С. Ливитт (1868-1921) среди переменных звёзд Малого Магелланового Облака. Однако сама Ливитт не отождествила наблюдаемые переменные с цефеидами. Позднее это сделал Герцшпрунг, который указал на возможность измерения расстояний с помощью цефеид. Действительно, определяя по периоду колебаний абсолютную величину цефеиды и сравнивая её с видимой величиной, легко определить расстояние до неё. Самым трудным при использовании этой методики было установление нуль-пункта. Большую работу по внедрению способа определения расстояний по цефеидам и определению нуль-пункта провёл Х. Шепли и В. Бааде. Бааде показал, что нуль пункт у цефеид, принадлежащих к населению звёзд I типа, отличается от нуль-пункта цефеид населения II типа на  $1^m,5$ .

Таким образом, установление шкалы расстояний на основе зависимости период-светимость цефеид оказалось трудоёмким и не простым делом. В 1924 Э. П. Хаббл (1889-1953) обнаружил, что так называемая туманность Андромеды является галактикой. Ему удалось обнаружить в ней 12 цефеид, по которым была получена оценка расстояния до этой галактики (900000 св. лет, что в полтора раза меньше современных оценок).

Если бы во вселенной не существовали маяки, подобные цефеидам, то обнаружение разбегания галактик было бы невозможным. Шкала расстояний постоянно уточнялась, что приводило к изменению значений постоянной Хаббла от первоначального 500 km/s/Mpc до  $70 \text{ km/s/Mpc} \pm 7 \text{ km/s/Mpc}$  к настоящему времени.

## 7.2. Вспыхивающие и взрывающиеся звёзды

Если цефеиды меняют свою яркость периодически, то существуют звёзды, яркость которых меняется случайным образом в широком динамическом диапазоне амплитуд вариаций. К таким звёздам относятся вспыхивающие, новые и сверхновые.

*Вспыхивающие звёзды* [10]. Первым, обнаружившим вспышку звезды, был Герцшпрунг. Произошло это в 1924 г., при просмотре снимков звезды слабой светимости в созвездии Киля он заметил у нее внезапное увеличение блеска на 2 зв. величины. Понятие «новой» к этому времени в астрономии уже использовалось, но вспыхнувшая звезда под это понятие не попадала – слишком кратковременной была вспышка. Заметного интереса среди астрономов от-

крытие Герцшпрунга не вызвало. Повторно наблюдение вспышки звезды произошло лишь в 1947 г. Исследуя собственное движение красного карлика UV Cet, американский астроном Карпенгер на серии последовательных с интервалом в 4 минуты снимков обнаружил двадцатикратное увеличение блеска звезды на втором снимке по сравнению с первым. На последующих снимках блеск монотонно падал и на пятом снимке вернулся к нормальному значению.

Далее темпы обнаружения вспыхивающих звёзд ускорились. К 1970 г. их список достиг 50. Учитывая ограниченность технических возможностей наблюдения, можно ожидать, что в скором времени большая часть вспыхивающих звёзд в доступной области наблюдений будет обнаружена. К 1982 г. в каталоге Аро для скопления Плеяд (площадь 20 град<sup>2</sup>) насчитывалось 519 вспыхивающих звёзд.

Гурзадян приводит 12 характерных признаков вспышек:

1) Основной признак – внезапное и сильное увеличение блеска в U, B и V областях спектра. В подавляющем числе случаев это увеличение не превосходит 1<sup>m</sup>. Часто это увеличение ~1<sup>m</sup> - 2<sup>m</sup>, иногда 6<sup>m</sup> - 7<sup>m</sup>, очень редко 8<sup>m</sup> в U.

2) Во время вспышки действует правило  $\Delta m(U) > \Delta m(B) > \Delta m(V)$ .

3) Вспышки типа I (типа UV Cet). Время увеличения блеска от нескольких секунд, до нескольких минут, время перехода к нормальной светимости от нескольких минут до часа.

4) Вспышки типа II (типа  $\tau$  Тельца). Время увеличения блеска 30 минут и больше, время перехода к нормальной светимости от 3-х до 10 часов.

5) Отношение  $\Delta m(U)/\Delta m(B)$  и  $\Delta m(B)/\Delta m(V) \sim 2$  доходит до 4-х и больше – признак нетеплового характера вспышки. При увеличении температуры вдвое это отношение было бы ~1.25.

6) Чаще всего вспышки наблюдаются у поздних спектральных классов M0 – M6, иногда у K5-M0, очень редко у G5-K0.

7) Во время вспышки усиливаются эмиссионные линии и появляются новые, соответствующие высоким потенциалам ионизации.

8) Линии поглощения фотосферы замываются, а новые не появляются.

9) В инфракрасной области заметных изменений блеска не наблюдается.

10) Вспышка в оптическом диапазоне сопровождается вспышкой в радио диапазоне.

11) Рентгеновская вспышка.

12) Для вспышек звезд типа UV Ceti наблюдаются определенные зависимости между параметрами вспышки.

По мнению известного мексиканского астронома Г. Аро звезда может быть отнесена к разряду вспыхивающих, если темп нарастания её блеска во время вспышки больше  $0^m.005 \text{ с}^{-1}$ . В 1974 г в UV Ceti наблюдалась вспышка с темпом роста  $2^m.8 \text{ с}^{-1}$ . Диапазон наблюдаемой энергий вспышки  $\sim 10^{27} \div 10^{34}$  эрг.

Гурзadyн активно развивает и пропагандирует гипотезу быстрых электронов. Согласно этой гипотезе вспышка в спектральных диапазонах *UBV* происходит как следствие обратного Комптон-эффекта – столкновение «холодных» фотонов с релятивистскими электронами. Быстрые электроны согласно Гурзadyну генерируют всплывающие из недр звезды в фотосферу фрагменты гипотетического протозвёздного вещества (первоисточник гипотезы протозвёздного вещества - В. А. Амбарцумян). Лишь в молодых звёздах наблюдается этот процесс. По мере старения звезд всплывание замедляется и совсем прекращается. Поэтому Гурзadyну считает не правомочным сравнение солнечных вспышек со вспышками молодых звёзд поздних спектральных классов. Однако наблюдается любопытное совпадение: энергия, соответствующая корональному выбросу масс Солнца (СМЕ)  $\sim 10^{31} \div 10^{32}$  эрг. Солнечной вспышке также соответствует энергия  $10^{32}$  эрг. Хотя наблюдательного материала по СМЕ и солнечным вспышкам более чем достаточно, удовлетворительной интерпретации этих явлений до сих пор нет. Чаша весов склоняется в пользу мнения, что и солнечные вспышки и СМЕ своей энергией обязаны магнитному полю. Однако завершённой теории генерации магнитных полей Солнца и межпланетного магнитного поля не существует. Возможно, магнитные поля не генерируются, а просто являются присущим атрибутом фрагментов гипотетического протозвёздного вещества, эпизодически извергаемого Солнцем и вспыхивающими звёздами?

## 8. Новые и Сверхновые звёзды

Если вспыхивающие звезды являются рекорсменами по темпам увеличения блеска, то новые и сверхновые рекорсмены по амплитуде вариаций блеска и по полной энергии, выделяемой во время вспышки (правильней сказать – взрыва звезды). По началу между

новыми и сверхновыми не делалось различия, хотя это совершенно разные явления [11, 12, 13].

20 августа 1885 г. Гартвиг в центральной части туманности Андромеды заметил звезду, которую ещё 11 августа он не видел. В то время эта туманность считалась газовым образованием, принадлежащим нашей Галактике. Это обстоятельство было определяющим при интерпретации появления новой. Одни считали, что имело место внезапное образование звезды из газового облака, другие полагали, что произошло столкновение звезды с туманностью. Лишь в 1924 стало ясно, что туманность Андромеды является удаленной от нас более чем на миллион световых лет галактикой.

Интерес к новым возобновился в 1917 г. Однако разделение новые – сверхновые произошло позднее. Этим термином мы обязаны В. Бааде и Ф. Цвики (1898-1974). Впервые этот термин прозвучал в 1931 г., а в 1934 г. Бааде и Цвики высказали предположение об образовании нейтронных звёзд в результате взрывов сверхновых.

## 8.1. Новые звёзды

*Новые* в среднем увеличивают свой блеск на  $12^m$  за несколько суток, затем блеск сильно уменьшается в течение нескольких недель. Но время релаксации к нормальной светимости длится годами и даже десятилетиями. В максимуме блеска абсолютная светимость новых достигает  $-8^m$ . ( $m_n - m_\odot = -2.5 \lg(L_n/L_\odot)$ ,  $L_n \sim 10^5 L_\odot \sim 10^{38} \div 10^{39}$  эрг/с). Общее количество энергии, освобождаемой при вспышке новой  $\sim 10^{47}$  эрг. Часть этой энергии расходуется на создание газовой оболочки, скорость расширения которой  $\sim 1500$  км/с. Масса оболочки оценивается в  $10^{28} \div 10^{29}$  г.

Понимание механизма вспышек новых стало возможным после того, как было установлено, что все они принадлежат тесным двойным системам. Впервые это было обнаружено в 1954 М. Уокером для новой 1934 г. Эта система состоит из красного и белого карликов с периодом обращения их относительно центра масс 4 часа 39 мин. Взрыв произошел из-за перетекания вещества с красного карлика на поверхность белого. При достижении критической массы и температуры происходит термоядерная реакция углеродного цикла, результатом которой и является вспышка новой.

Среди новых существуют повторяющиеся новые с периодом повторяемости несколько десятков лет. Энергия вспышки повторяю-

щихся  $\sim 10^{42} \div 10^{43}$  эрг. Существуют карликовые новые (звезды типа U Близнецов) с периодом повторяемости 50 – 100 суток и амплитудой вспышки  $4\text{--}5^m$ .

## 8.2. Сверхновые звёзды

*Вспышки Сверхновых* представляют собой наиболее интенсивные и разрушительные процессы, которые могут происходить со звёздами большой массы. Как отмечалось выше 20 августа 1885 г. Гартвиг в центральной части туманности Андромеды наблюдал новую звезду. После того, как Хаббл оценил расстояние до туманности, стало ясно, что светимость вспыхнувшей звезды соизмерима со светимостью галактики.

В 1934 г. Бааде и Цвики выделили сверхновые в самостоятельный класс вспыхивающих звезд. В настоящее время к сверхновым относят вспышки с мощностью излучения  $> 10^{41}$  эрг/с. СН различаются по кривым блеска, по виду спектра излучения, по характеру изменению спектров в процессе вспышки. Было много попытки разбиения класса сверхновых на отдельные типы с учётом этих различий. В 1941 г. Минковским было предложено деление СН на два типа. Основным признаком, по которому производится деление, это наличие (тип II) или отсутствие (тип I) водорода в спектрах сверхновых при максимуме блеска. Кривые блеска у сверхновых типа I имеют схожий характер, тогда как у звезд типа II эти кривые могут существенно различаться. Деление на типы не является строгим, о чем свидетельствует следующий пример. Из 173 СН галактик из списка Вокулера 44 были отнесены к типу I, 28 – к типу II, а остальные не были классифицированы. Были неудачные попытки введения большего числа типов. Неудовлетворительность существующей классификации отмечается в работе (Massimo Turatto. Classification of Supernovae. ArXiv:astro-ph/0301107).

В работе (Mario Hamuy – arXiv:astro-ph/0301006) можно найти современные примеры сверхновых различных типов.

*Тип СН I.* 1. Вспыхивают в галактиках любых типов. Частота вспышек растёт при переходе от эллиптических галактик к спиральным.

2. Абсолютная величина в максимуме блеска:  $M_B = -19^m.7$  при дисперсии  $0^m.6$ .



3. Кривые блеска. Быстрый рост светимости в течение  $3 \div 20$  суток. Длительность максимума  $\sim 10$  суток. Затем медленный спад светимости со скоростью  $0^m.03 \div 0^m.1$  в сутки. Причём типично: сначала быстрый спад в течение 30-40 суток со скоростью  $0^m.1$ , затем со скоростью  $0^m.01 \div 0^m.02$ . И переход к норме экспоненциальный с характерной скоростью  $0^m.01 \div 0^m.02$ .

4. Полная излучаемая энергия вспышки  $4 \cdot 10^{49}$  эрг. Светимость в максимуме  $4.5 \cdot 10^{43}$  эрг/с.  $Lg(L/L_{\odot}) = (19.7 + 4.8)/2.5 = 9.8$ ,  $L = 10^{9.8} L_{\odot} = 2.5 \cdot 10^{43}$  эрг/с.

5. Средняя продолжительность вспышки 350 дней.

*Тип СН II.* 1. Вспыхивают только в спиральных галактиках.

2. Абсолютная величина в максимуме блеска изменяется в интервале  $M_B = -15^m.9 \div -20^m.9$ .

3. Кривые блеска разнообразны. Максимум достигается за  $\sim 20$  суток. Максимум длится дольше, чем у звёзд типа I.

4. Полная энергия вспышки  $\sim 10^{49}$  эрг. Светимость в максимуме  $7.5 \cdot 10^{42}$  эрг/с.

5. Продолжительность вспышки не более 150 дней.

$I_b$  и  $I_c$  вспыхивают только в спиральных галактиках. Вспышки сопровождаются излучением в рентгеновском и радио диапазонах. Однако основная энергия вспышки трансформируется в кинетическую энергию расширяющейся оболочки. Кинетическая и тепловая энергия оболочки  $E_0 \sim 10^{50} \div 10^{51}$  эрг. Линии в спектрах сверхновых очень широкие, свидетельствующие о скоростях расширения фотосферы порядка 3000-10000 км/с.

*Механизм взрыва.* Вспышки СН требуют источников энергии взрывного типа. Нарастание блеска СН в течение 10-20 суток определяется скорее инерционностью процесса выноса энергии от места до поверхности фотосферы, чем длительностью процесса взрыва. За это время размеры фотосферы звезды увеличиваются многократно и достигают на стадии максимума блеска  $\sim 100$  а. е. К сожалению, ещё ни разу не удавалось наблюдать СН до взрыва. Поэтому её параметры до взрыва оцениваются в результате анализа самой вспышки и её остатков.

Предполагается, что вспышка СН I реализуется у звёзд, масса которых лежит в диапазоне  $4 \div 8 M_{\odot}$  [15]. На поздней стадии эволюции

звезды в результате выгорания гелия образуется С-О ядро. Масса ядра определяется начальным значением массы звезды на главной последовательности. Если масса относительно не велика, то образуется вырожденное С-О ядро с массой меньшей предела Чандрасекара. По мере накопления ядром продуктов горения слоевого источника растёт его масса и повышается температура, при этом давление меняется незначительно. При создавшихся условиях реакция термоядерного синтеза от С-О до элементов группы железа протекает взрывообразно. Причем, в зависимости от начальной плотности в центре ядра возможны два варианта: а) при плотности меньшей  $9 \cdot 10^9 \text{ г/см}^3$  происходит полный разлёт ядра с кинетической энергией  $E_0 \sim 10^{51}$  эрг; б) при плотности большей  $9 \cdot 10^9 \text{ г/см}^3$  происходит выброс внешних слоёв ядра с кинетической энергией  $E_0 \sim 10^{50}$  эрг, а ядро превращается в нейтронную звезду.

Вспышка СН типа II реализуется у звёзд, масса которых превосходит  $10 M_{\odot}$ . У этих звёзд образуется невырожденное С-О ядро, в котором происходит цепочка термоядерного превращения элементов вплоть до группы железа. По мере истощения ядерного топлива в центре звезды начинает увеличиваться плотность и температура, следствием чего является процесс разрушения ядер группы железа. Потеря энергии на расщепления ядер способствует гравитационному коллапсу звезды, в результате которого образуются нейтронные звезды.

Можно оценить энергию, выделяемую при гравитационном коллапсе, пользуясь теоремой вириала. При уменьшении радиуса звезды от  $R_n$  до  $R_k$  кинетическая энергия сжимаемого вещества увеличится на величину

$$\Delta E = \frac{GM^2(R_n - R_k)}{R_n R_k}.$$

При  $M=M_{\odot}$  и  $R_k=10^6$  см уменьшение радиуса ядра на 10% приводит к выделению энергии  $\sim 2 \cdot 10^{52}$  эрг. Часть этой энергии тратиться на расщепления ядер железа, часть уносится нейтринным излучением, а часть на создание вспышки СН со всеми её проявлениями.

Эта часть энергии, в конечном счете, переходит в кинетическую и тепловую энергию оболочки. Увеличение блеска связано с нагревом расширяющихся внешних слоев звезды ударной волной, причи-

на которой связана с отскоком внутренних слоев от коллапсирующего ядра массивной звезды. Ударная волна нагревает и ускоряет оболочку и в момент ее выхода на поверхность возникает кратковременная вспышка УФ-излучения, но основная часть энергии высвечивается позднее по мере ускорения диффузии излучения в процессе расширения.

Расширение газа обычно сопровождается понижением температуры, но расширяющаяся оболочка СН имеет внутренние источники энергии в виде ионизованного газа и радиоактивного  $Ni$ . Для оболочки в 8-10 масс Солнца при рекомбинации водорода выделяется порядка  $10^{47}$  эрг. Полный запас энергии в радиоактивном распаде может быть порядка и больше энергии рекомбинации.

У "средней" сверхновой II типа уменьшение блеска в видимой области на порядок происходит примерно за 100 дней. Это время тесно связано с периодом полураспада  $^{56}Co$ . (Цепочка  $^{56}Ni \rightarrow ^{56}Co \rightarrow ^{56}Fe$ ). Сверхновые II типа связаны с эволюцией массивных звезд, одиночных или не входящих в тесные двойные системы.

### 8.3 Остатки сверхновых и их взаимодействие с межзвездной средой

Сброшенная при вспышке сверхновой оболочка расширяется со сверхзвуковой скоростью в межзвездную среду и образует ударную волну. Различают несколько стадий взаимодействия оболочки с окружающей средой.

Стадия 1. *Свободный разлет*. На этой стадии оболочка движется по инерции так, как если бы внешней среды не было вообще. Излучение оболочки не играет роли в ее динамике. Стадия заканчивается при сгребании массы окружающего вещества, равной массе расширяющейся оболочки. Для  $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$  при массе оболочки  $M_0 = M_\odot$  этот момент наступает при радиусе оболочки  $R_0 \approx 2 \text{ пк}$ , примерно через 100 лет после начала расширения.

Стадия 2. *Адиабатическое расширение*. Радиационные процессы по-прежнему динамически неважны (отсюда название – адиабатическая стадия), так как температура газа за фронтом ударной волны очень высокая. Кинетическая энергия оболочки расходуется на нагрев газа за фронтом сильной ударной волны и на ускорение сгребенного межзвездного газа. Когда масса сгребенного газа много

больше  $M_0$ , движение оболочки довольно точно описывается автономным решением Л.И. Седова для сильного взрыва в среде.

Стадия 3. *Стадия снегоочистителя* (англ. "snow-plow"). Наступает после катастрофического охлаждения газа оболочки, когда температура падает ниже  $\sim 6 \cdot 10^5$  К и плазма начинает интенсивно высвечивать запасенную тепловую энергию. Оболочка становится тонкой и холодной, поскольку скорость газа, прошедшего через ударную волну, меньше скорости движения фронта по среде и газ, поджимаемый давлением оболочки изнутри, долго остается вблизи фронта УВ. Движение УВ поддерживается за счет запасенного в оболочке импульса УВ сгребает окружающий газ и передает ему свой импульс, и ситуация похожа на сгребание снега снегоочистителем. В этом режиме расширение оболочки замедляется. Разреженный горячий газ внутри оболочки практически не остывает и является дополнительным источником расширения оболочек на поздних стадиях. По прошествии  $\sim 10^4$  лет после начала расширения эмиссия оболочек сверхновых уменьшается настолько, что они становятся практически неразличимыми на фоне среднего излучения межзвездной среды.

Учитывая, что большая часть энергии вспышки СН расходуется на создании оболочки, естественно пытаться эти оболочки обнаружить. Однако история исследования СН складывалась совсем не естественно. Нашей галактике не повезло. Наблюдение последней СН датируется 1658 г. (Кассиопея).

Исторические СН: 185, 393, 1006, 1054, 1181, 1572, (Тихо Браге), 1604, (Кеплер), 1658. Оболочки приведенных исторических СН находятся в стадии расширения.

## 9. Нейтронные звёзды

В 1934 Цвикки и Бааде высказали гипотезу о возможности образования сверхплотных нейтронных звёзд в результате вспышки СН. В 1937 г Л. Ландау опубликовал в ДАН СССР работу «Об источниках звездной энергии». В этой работе Ландау высказал идею, что светимость многих звезд может происходить за счет аккреции вещества на нейтронное ядро звезды. Он также показал, что в звёздах с  $M=1.5 M_\odot$  образование подобных ядер происходит неизбежно.

Первые расчёты внутреннего строения нейтронных звёзд были проведены Дж. Оппенгеймером и Г. Волковым. Они доказали существования верхнего предела массы нейтронных звёзд, после которо-

го те должны превращаться в «черные дыры». В 1960 г. В. А. Амбарцумян и Г. С. Саакян провели расчёта нейтронных звёзд с учётом новых данных об элементарных частицах.

Очень продуктивной для понимания физики СН оказалась так называемая «крабовидная туманность» или СН 1054 («звезда гостя»). Интенсивно занимался исследований СН И. С. Шкловский [11]. Он предложил синхротронный механизм для объяснения свечения туманности. В. Л. Гинзбург и независимо И. М. Гордон предсказали поляризацию излучения. Уже в 1954 г. эта поляризация была обнаружена В. А. Домбровским и М. А. Вашакидзе. С. Б. Пикельнер в 1956 г. провел оценку концентрации и энергии электронов в Крабовидной туманности и показал, что в туманность непрерывно подкачивается энергия с мощностью  $\sim 10^{38}$  эрг. Природа источника этой энергии была выявлена в 1964 г. Н. С. Кардышевым.

## 9.1. Радиопульсары

Обнаружение нейтронных звёзд произошло много позднее, чем они были предсказаны. Сначала были обнаружены пульсары. Причем обнаружены случайно. Научная и ненаучная общественность шестидесятых прошлого столетия была увлечена поиском внеземных цивилизаций. В феврале 1968 г «Nature» опубликовал сообщение о приёме радиосигналов из глубин Вселенной группой ученых из Кембриджа, возглавляемых Э. Хьюишем. Группа занималась исследованием влияния солнечного ветра на мерцание радиосигналов. Для этой цели был построен радиотелескоп (длина волны 3.7 м). Наблюдением и обработкой результатов занималась аспирантка Дж. Белл. За неделю набиралось 210 м ленты самописца. Уже через два месяца после начала наблюдений (июль 1967 г) она обнаружила непонятные отклонения сигнала при наблюдении в определенной части неба. В октябре для уяснения ситуации, она решила с большим временным разрешением проследить за этим участком. В конце ноября были обнаружены импульсы, повторяющиеся с удивительной периодичностью (1.377 с). К моменту публикации в «Nature» было обнаружено 4 пульсирующих источника. Высказывались различные идеи по поводу этих источников. Не упускались из виду даже внеземные цивилизации («зеленые человечки»). Хойл, присутствующий на семинаре в Кембридже, где Хьюиш делал доклад, высказал предположение, что виновниками импульсов могут быть нейтронные звёзды.

В 1968 году в Крабовидной туманности был открыт радиопульсар, период которого оказался равным 0,033 с - столь быстро могла вращаться лишь нейтронная звезда. Так подтвердилось не только предположение Л. Д. Ландау, но и гипотеза В. Бааде и Ф. Цвикки о связи нейтронных звезд со вспышками сверхновых (известно, что Крабовидная туманность образовалась после вспышки сверхновой, наблюдавшейся в 1054 году [11]).

Радиопульсары бывают одиночными и двойными. Двойные системы удобны для определения масс. Оказалось, что средняя масса нейтронных звёзд  $M_n \approx 1.33 M$ .

То, что пульсар Краба – нейтронная звезда, а не белый карлик подтверждается элементарными расчётами. Действительно максимальный радиус звезды, при котором центробежное ускорение не превосходит гравитационное, определяется выражением

$$\Omega^2 R = \frac{GM}{R^2} \Rightarrow R \leq \left( \frac{GM}{\Omega^2} \right)^{1/3}.$$

При  $\Omega = 188 \text{ с}^{-1}$  (как у Краба) и  $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$  получаем  $R < 156 \text{ км}$ , что существенно меньше типичного размера белого карлика.

Самым замечательным в нейтронных звездах оказалось то, что они обладают сверхмощным магнитным полем, напряженность которого на поверхности звезды достигает  $10^{12} \text{ Гс}$ . В. Л. Гинзбург в 1964 г. показал, что напряженность магнитного поля должна быть чрезвычайно большой. Этот вывод был получен с условием вмерзненности магнитного поля, которое определялось выражением  $BR^2 = \text{const}$ . Исходя из этого условия, можно получить при сжатии первоначального поля  $1 \div 100 \text{ Гс}$  в  $10^5$  раз напряженность  $10^{10} \div 10^{12} \text{ Гс}$ .

Подобные оценки получаются в модели магнитного поля Пачини и Голда, которые оценивали напряженность магнитного поля по темпам замедления вращения нейтронной звезды. Они считали, что энергия вращения нейтронной звезды уменьшается за счет магнитно-дипольного излучения, мощность которого согласно классической электродинамике определяется выражением

$$L_d = \frac{2\mu^2 \sin^2 \beta}{3c^3} \Omega^4;$$

где  $\mu$  – дипольный магнитный момент,  $\beta$  – угол между осью вращения и осью магнитного диполя,  $\Omega$  – угловая частота вращения ди-

поля. Предполагается, что  $\square$  излучение происходит за счёт замедления вращения звезды. Энергия вращения звезды определяется выражением  $E = I\Omega^2/2$ . Предполагая постоянство момента инерции  $I$ , из

равенства  $\frac{dE}{dt} = L_d$  можно получить

$$B = \left( \frac{6Ic^3\dot{\Omega}}{R^6\Omega^3 \sin^2 \beta} \right)^{1/2}.$$

Из этого выражения для типичных нейтронных звёзд следует оценка  $B \sim 10^{12} \text{ Гс}$ . Разумеется, эта оценка приближенная, а способ её получения уязвим для критики.

Наличие плазменной оболочки нарушает условия применимости выражения дипольного излучения. Энергия от центральной звезды может передаваться оболочке различными способами. Магнитное поле в процессе передачи энергии может участвовать скорее в роли трансмиссии. При вращении магнитного диполя возникает электрическое поле, напряженность которого определяется выражением  $E \cong \Omega R B / c$ . При  $\Omega = 100 \text{ с}^{-1}$ ,  $R = 10^6 \text{ см}$  и  $B = 10^{12} \text{ Гс}$ ,  $E \cong 10^{12} \text{ В/см}$ . Такие поля приводят к появлению релятивистских заряженных частиц, которые в свою очередь вызывают синхротронное излучение.

Синхротронное излучение производят заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле с релятивистскими скоростями. Это излучение было предсказано Э. Шоттом в 1913, а экспериментально обнаружено позднее в синхротронах. Отсюда название.

Первый вопрос, возникший после обнаружения пульсара, заключался в выявлении причин пульсации. Рассматривались три версии: пульсация светимости звезды в целом, затмения и вращения. С учётом быстрых периодов пульсаций первые две версии пришлось отбросить. Осталось лишь вращение. Но, чтобы вращением объяснить пульсации, необходимо предположить наличие узкой диаграммы направленности излучения звезды. Таким образом, термин пульсар (пульсирующий радиоисточник) – не точен. Нет пульсаций, а есть вращения диаграммы направленности излучения. Сформировать подобные диаграммы можно только при наличии сильного магнитного поля.

Поведение нейтронной звезды определяется соотношением между гравитационными и электромагнитными силами, которые в свою очередь зависят от периода вращения нейтронной звезды вокруг

своей оси, величиной магнитного поля и ориентацией оси вращения относительно оси магнитного диполя.

Разделяют три стадии эволюции нейтронной звезды: режим *эжекции*, режим *пропеллера* и режим *аккреции*.

Режим *эжекции*. Вращаясь вначале очень быстро, нейтронная звезда испускает радиоволны, электромагнитное излучение и релятивистские частицы. Электромагнитное излучение и потоки релятивистских частиц, преодолевая гравитационное притяжение, отбрасывают окружающее вещество. При этом звезда быстро теряет энергию вращения.

Режим *пропеллера*. Центробежная и электромагнитная силы ещё достаточно велики, чтобы сопротивляться силам гравитационного притяжения. Поэтому аккреция слаба.

Режим *аккреции*. Центробежная и электромагнитная силы слабы по сравнению с гравитационным притяжением. Вещество со звезды партнёра падает на нейтронную звезду.

Ключевым вопросом теории нейтронных звёзд является разработка механизма генерации электромагнитного поля и исследование структуры этого поля. Для решения этого вопроса необходимо решать магнитогидродинамическую задачу эволюции поля при заданных начальных условиях. Когда эта задача будет решена и будет ли вообще решена - трудно прогнозировать. Уже при её постановке возникают противоречия.

Противоречие: нейтронная звезда – остаток вспышки СН. Предвспышечная звезда содержит ядро с отработанным ядерным топливом и зоной горения в ближнем окружающем ядро слое. Область, где генерируется магнитное поле (конвективная зона), находится снаружи зоны термоядерного синтеза. Ввиду высокой проводимости вещества ядра и зоны горения магнитное поле проникнуть туда не может (с учётом того, что оно в конечном итоге переменное). В момент вспышки вся материя вместе с вмороженным в неё магнитным полем выбрасывается наружу, образуя расширяющуюся с гиперзвуковой скоростью оболочку. В звездном остатке (нейтронной звезде) магнитного поля в этом случае не должно быть. Но оно есть. О чем свидетельствуют разнообразные наблюдения. Большая часть этих наблюдений лишь косвенно позволяет судить о напряженности этого поля. Однако имеют место попытки непосредственного измерения напряженности поля. Согласно предварительному сообщению напряженность этого поля оказалась в 30 раз меньше предсказываемой косвенными методами.



Как снять противоречие? Где слабое звено в цепочке выше приведенных рассуждений? По всей видимости, ключ к раскрытию тайны спрятан в механизме генерации магнитного поля. Как пишет В.М. Липунов [14]: - «Вообще, генерация магнитного поля - это целая проблема даже для обычных звезд. Для нейтронных звезд проблема еще менее разработана, и пока нет надежных результатов».

## 9.2. Рентгеновские пульсары

«Существование столь сильных магнитных полей у нейтронных звезд выдвинуло их в особый класс астрономических объектов, которые взаимодействуют с окружающим веществом посредством двух типов сил: электромагнитных и гравитационных. В зависимости от соотношения этих сил нейтронные звёзды проявляют себя по разному. Впервые это важное обстоятельство объяснил советский астрофизик В. Ф. Шварцман в 1970 году. Он показал, что молодая нейтронная звезда (радиопульсар) постепенно должна замедлить свое вращение настолько, что гравитационные силы превысят электромагнитные, и тогда под действием силы тяжести плазма начнет падать на поверхность нейтронной звезды. В результате должен возникнуть рентгеновский пульсар. Такие объекты действительно вскоре были обнаружены группой американских исследователей под руководством Р. Джиаккони. Открытие радио и рентгеновских пульсаров явилось полным триумфом». (<http://xray.sai.msu.ru/~lipunov>).

В 1971 г. были открыты рентгеновские пульсары. Уже первые наблюдения показали, что они принципиально отличаются от радиопульсаров: рентгеновские пульсары не замедляются, а ускоряются! С чем связано столь разительное отличие в их поведении? Чем вообще определяется поведение нейтронной звезды? Оказалось, что радио и рентгеновские пульсары генетически связаны, все дело лишь в том, что условия, в которых они находятся, совершенно различны: радиопульсары – это в большей части одиночные нейтронные звезды, а рентгеновские пульсары, как правило, – нейтронные звезды в двойных системах.

Рентгеновские пульсары светятся из-за того, что на поверхность нейтронной звезды падает (аккрецирует) вещество, захваченное их гравитационным полем. Поставляет им это вещество обычная звезда - второй компонент двойной системы. Вещество, стекающее с обычной звезды, участвует вместе с ней в орбитальном вращении и, следовательно, обладает вращательным моментом относительно

нейтронной звезды. Прежде чем упасть на ее поверхность, вещество через магнитное поле отдает свой момент нейтронной звезде, закручивая ее. Именно поэтому рентгеновские пульсары ускоряются.

## 10. Рентгеновская астрономия

### 10.1. Механизмы рентгеновского излучения

Энергия оптических фотонов заключена в диапазоне  $1 \div 10$  эв, ультрафиолетовых –  $10 \div 100$  эв, рентгеновских (Х-лучей) –  $0.1 \div 100$  Кэв ( $0.1 \div 100 \text{ \AA}$ ) [15,16]. Атмосфера Земли препятствует проникновению Х-лучей на её поверхность. Поэтому космические рентгеновские исследования стали возможны лишь после того, как появилась возможность выносить детекторы рентгеновского излучения на большие высоты. В лабораторных исследованиях РИ впервые было получено при столкновении электронных пучков с ядрами мишени.

Согласно закону смещения Вина  $\lambda_{\max}=0.29/T$  см. Мягкому рентгену соответствует  $\lambda \sim 10^{-6}$  см или  $T \sim 300\,000$  К. Солнечная корона имеет температуру  $\sim 10^6$  К. Однако, из-за малой оптической толщи короны интенсивность этого излучения не велика. Она существенно возрастает во время солнечных вспышек. На месте вспышек появляются плотные облака плазмы с температурой, достигающей  $10^7$  К.

Известны следующие механизмы РИ: а) *Тормозное излучение* возникает в результате резкого изменения скорости электронов при столкновении с ядрами атомов. Если оптическая толщина плазмы в рентгеновском диапазоне много больше единицы, то спектр РИ будет тепловым и описываться формулой Планка. Если плазма прозрачная, то спектр её РИ будет иным.

Скорость потери энергии отдельным электроном определяется выражением

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{e^2 |\dot{\mathbf{v}}|^2}{6\pi c^3}.$$

В предположении максвелловского распределения скоростей электронов при кулоновском столкновении спектральная мощность РИ кубического см плазмы будет определяться выражением

$$j_\nu = 6,8 \cdot 10^{-38} Z^2 N_e N_i T^{-1/2} g(x) \exp(-x), \text{ эрг}/(\text{см}^3 \cdot \text{Гц}).$$

где  $x = h\nu/kT$ ,  $N_e$  и  $N_i$  концентрации электронов и ионов,  $Z_e$  – электрический заряд ионов,  $g(x) = -\sqrt{3} \cdot \ln(x)/\pi$  при  $x \ll 1$  и  $g(x) = \sqrt{x}$  при  $x \gg 1$ . Отсюда видно, что спектр близок к плоскому в области низких частот и экспоненциально убывает в области высоких частот.

Полная мощность тормозного РИ кубического см плазмы определяется выражением  $W = 1,435 \cdot 10^{-27} Z^2 T^{1/2} N_e N_i$ .

б) *Обратное комптоновское рассеяние*. При рассеянии фотона на релятивистских электронах происходит изменение частоты за счёт эффекта Доплера согласно выражению

$$\nu' = \nu \frac{1 - \beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \theta'}, \quad \square \square$$

где  $\theta$  – угол между вектором скорости электрона и волновым вектором фотона, не штрихованные величины до столкновения, штрихованные – после,  $\beta = v/c$ . Максимальное смещение частоты происходит при лобовых столкновениях, когда  $\cos \theta = -1$ , а  $\cos \theta' = 1$ .

в) *Синхротронное излучение*. При движении заряженных частиц в магнитном поле энергия их движения трансформируется в излучение с мощностью на одну частицу  $dE/dt = 0,98 \cdot 10^{-3} B^2 (E/mc^2)^2$  эв/с. Значение частоты, на которую приходится максимальная спектральная мощность, определяется соотношением  $\nu = 4,3 \cdot 10^6 B (E/mc^2)^2$  Гц.

Средняя напряженность поля в Крабовидной туманности оценивается величиной  $\sim 7 \cdot 10^{-4}$  Гс,  $E/mc^2 > 10^7$ , соответственно  $\nu > 3 \cdot 10^{17}$  Гц или  $h\nu > 1$  Кэв. В нейтронных звездах определяющую роль в мощности синхротронного РИ играет магнитное поле.

г) *Линейчатый спектр РИ*. В сильных магнитных полях энергия поперечного (относительно поля) движения электронов может принимать лишь квантованные значения  $\varepsilon = h\nu_s(m_s + n + 1/2)$ . Здесь  $\nu_s = eB/2\pi mc$  – гирочастота электрона,  $m_s = \pm 1, 2$  – проекция спина электрона на направление магнитного поля,  $n = 0, 1, 2$ . Переходам электронов с верхних энергетических уровней на нижние сопровождается излучением на частоте кратной гирочастоте электрона. В спектре РИ Her X-1 наблюдается линия, соответствующая энергии  $h\nu = 58$  Кэв ( $58 \cdot 2,4 \cdot 10^{17}$  Гц,  $B = 2\pi mc \nu / e \sim 3,6 \cdot 10^{-7} \cdot 58 \cdot 2,4 \cdot 10^{17} = 5 \cdot 10^{12}$  Гс).

РИ с линейчатым спектром образуется при переходах электронов в тяжелых атомах или ионах на нижние энергетические уровни.

*Поглощение.* Поглощение РИ межзвездной средой определяется количеством поглощающих атомов на пути фотона. Основной компонентой межзвездного газа является водород. Поглощение можно аппроксимировать выражением  $\text{Lg } N_{\text{H}} \sim 2,5 \text{ Lg } E + 14$ . Здесь  $N_{\text{H}}$  [см<sup>-2</sup>] – число атомов водорода в столбе между излучателем и приемником сечением см<sup>2</sup>, которое способно уменьшить энергию фотона  $E$  [эв] в  $e$  раз.

## 10.2. Приборы рентгеновской астрономии

*Детекторы.* Специфика рентгеновской астрономии определяется энергией рентгеновских фотонов. Если оптическое излучение, как правило, приводит лишь к возбуждению атомов и молекул вещества, с которым оно взаимодействует, то рентгеновское излучение способно это вещество ионизировать. Именно на этом свойстве РИ основана работа рентгеновских детекторов.

Существует два основных типа детекторов рентгеновских квантов: пропорциональный газоразрядный счетчик и сцинтилляционный счетчик.

*Пропорциональный газовый* счетчик работает на основе фотоэффекта в газах и представляет собой плоскую коробку, заполненную тяжелым инертным газом (Ar, Xe) и метаном (или CO<sub>2</sub>) под давлением 1-3 атмосферы. Квантовая эффективность счетчика может достигать 90%.

*В сцинтилляционных детекторах* каждый рентгеновский квант вызывает вспышку ультрафиолетового и оптического излучения. Эта вспышка затем регистрируется фотоумножителем.

В мягкой рентгеновской области в качестве детекторов могут использоваться ПЗС матрицы.

Трудности становления рентгеновской астрономии определялись не только необходимостью размещения приборов наблюдения за пределами атмосферы Земли. Существовали и другие проблемы. Рентгеновским излучением в отличие от оптического излучения трудно “управлять” – собирать и определять направления прихода. В силу своей жесткости отражение РИ возможно лишь при скользящем падении на зеркало, что затрудняет изготовление рентгеновских телескопов с большой апертурой.

*Коллиматоры.* Наиболее простой способ определения направления прихода рентгеновского излучения реализуется с помощью коллиматоров. Принцип работы основан на поглощении стенками коллиматора РИ, приходящего с любых направлений вне поля зрения.

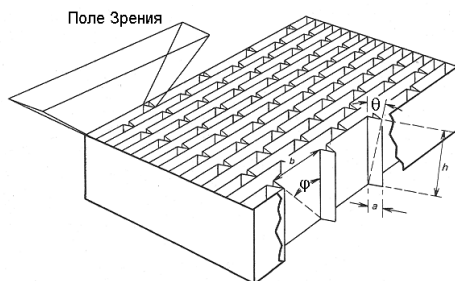


Рис. 2 Пластиначный коллиматор.

Коллиматоры бывают пластиначатого и решётчатого типов. Н на рис. 2 приведена схема пластиначатого коллиматора. Решётчатый коллиматор представляет собой систему сеток, затеняющих детекторы от РИ, приходящего с «ненужного» направления.

*Телескопы и спектрографы.* Поскольку коллиматоры не способны фокусировать принимаемое излучение, они обладают слабым разрешением и низкой чувствительностью. Материалов, способных фокусировать РИ за счёт рефракции не существует. Поэтому все рентгеновские телескопы рефлекторного типа. Однако рентгеновский рефлектор существенно отличается от оптического. Поскольку РИ отражается лишь при скользких углах, то для увеличения апертуры телескопа он собирается из системы концентрических зеркал. Схема такого телескопа представлена ниже на рис. 3.

Для исследования *спектральных характеристик* РИ используются несколько методов. В области мягкого рентгена используют несколько газоразрядных детекторов с различным газовым составом, чувствительных к рентгеновским квантам определенных энергий. Детектор рентгеновского телескопа обсерватории "Эйнштейн" имел 32 канала в области от 0.1 до 4.5 кэВ.

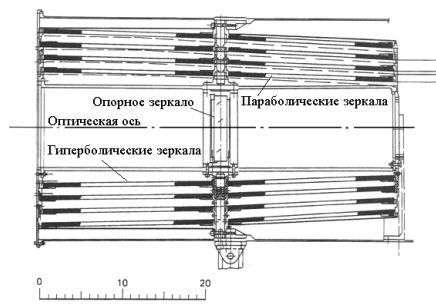


Рис.3 Схема рентгеновского телескопа.

Для более жесткого излучения возможно использование дифракционных решеток косого падения из Брэгговских кристаллов. Брэгговский кристалл отражает рентгеновские кванты в узком спектральном диапазоне

### 10.3. История рентгеновской астрономии

РИ было открыто в 1895 г. немецким физиком В.К. Рентгеном. Широко используется в медицине, исследовании материалов и других лабораторных исследований. Внедрение рентгеновских исследований в астрономию стало возможно лишь с наступлением космической эры. В силу поглощения РИ атмосферой Земли наземные наблюдения космического РИ невозможны.

Первый приём космического излучения был произведён в 1948 г. американскими исследователями. Специально подготовленная для индикации РИ фотолампа, помещенная на борту ракеты (высота до 200 км), почернела. Через год РИ излучение Солнца было зарегистрировано счетчиком фотонов, помещенном на ракете. Соответствующая показаниям счетчика светимость Солнца была оценена как  $3 \cdot 10^{23}$  эрг/с, т. е. на 10 порядков ниже оптической светимости. На карте неба появился первый источник РИ.

В 1960 г. состоялась первая конференция по рентгеновской астрономии. Её выводы были пессимистическими. Ожидаемый поток РИ от звезд был настолько мал, что даже десятикратное увеличение чувствительности приемников не давало надежды обнаружения этого излучения. Считалось, что рентгеновская астрономия – дело далекого будущего.

Тем не менее, эксперименты продолжались. Была высказана гипотеза, что Луна должна испускать рентгеновское излучение за счёт бомбардировки её поверхности электронами солнечного ветра и за счёт люминесценции солнечной радиации. Для проверки этой гипотезы группа американских исследователей (под руководством Б. Росси и Р. Джакони) провела в 1962 г. ракетные наблюдения рентгеновского излучения с помощью счетчиков Гейгера. Результат, полученный в результате этих наблюдений, оказался неожиданным. Был обнаружен источник с интенсивностью  $\sim 5$  фотон/см<sup>2</sup>с (впятеро больше, ожидаемой от Луны). Направление на источник не совпадало ни с направлением на Солнце, ни на Луну. Кроме того, был обнаружен фон неба с интенсивностью  $\sim 1,7$  фотон/см<sup>2</sup>с. Повторение эксперимента в 1963 г. уточнило положение неизвестного источника. Он оказался в созвездии Скорпиона. Поэтому источник был назван Sco X-1. Кроме того, был обнаружен новый источник в созвездии Тельца вблизи расположения Крабовидной туманности, названный Tau X-1. Видимый блеск обнаруженных источников в рентгеновском диапазоне лишь на три порядка уступал блеску Солнца, а расстояние до них составляло  $\sim 10^9$  а.е., следовательно, светимость этих источников в  $\sim 10^{15}$  раз превосходит рентгеновскую светимость спокойного Солнца. Стало ясно, что рентгеновская астрономия обнаружила новые объекты. Однако ракетные исследования не годились для более тонких и детальнейших исследований этих источников и открытия новых. Необходим был рентгеновский телескоп на спутниках.

Была запланирована серия спутников SAS (Small Astronomical Satellites). Первый спутник был запущен с итальянской платформы, плавающей у берегов Кении. Запуск был произведен 12 декабря 1970 г. в день независимости Кении. В честь торжества спутник был назван «Ухуру» (на языке суахили «свобода»). Вес рентгеновских счётчиков составлял 70 кг при общей массе спутника 175 кг. Чувствительность «Ухуру» позволяла наблюдать рентгеновские источники в  $10^4$  раз слабее Sco X-1. Аппарат обнаружил 339 источников.

Первый фокусирующий рентгеновское излучение телескоп был установлен на космическом аппарате «Skylab», запущенном в 1973. Этот телескоп обладал системой из двух зеркал и имел рентгеновский спектрограф. Предназначен для получения рентгеновского изображения Солнца.

Далее развитие рентгеновской астрономии связано с запусками следующих обсерваторий:

- 1) Einstein Observatory (1978), обнаружил более 7000 источников РИ.
- 2) ROSAT (1990), обнаружил более 60000 источников РИ.
- 3) ASCA (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) (1993). Предназначен для исследования распределения источников РИ в зависимости от энергии.
- 4) The Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) (1995). Предназначен для изучения быстрых вариаций РИ в широком диапазоне энергий.
- 5) BeppoSAX (1996). Предназначен для получения рентгеновских изображений источников, ассоциируемых с Гамма всплесками. Диапазон энергий от 0.1 до 300 keV.
- 6) Chandra X-ray Observatory (1999)

В Советском Союзе космические рентгеновские источники исследовались на спутниках серии «Прогноз», автоматической станции «Астрон», пилотируемом корабле «Салют -7».

#### **10.4. Источники космического рентгеновского излучения**

Рентгеновские источники можно разделить на два типа: точечные и диффузные. К точечным относятся нейтронные звёзды, квазары, ядра активных галактик. Диффузное РИ наблюдается от комет, корон Солнца и звёзд, облаков горячего межзвёздного и межгалактического газа.

Из 20 самых ярких точечных рентгеновских источников половина сосредоточена в окрестности созвездия Стрельца (балдж Галактики), а другая сосредоточена в узкой полосе плоскости диска Галактики. Лишь слабые рентгеновские источники распределены относительно равномерно по поверхности неба.

«Чандра» в течение 23 дней на площадке с угловым размером в 1/5 полной Луны обнаружил более 600 удаленных рентгеновских источников. Интенсивность некоторых из этих источников была столь слабой, что за 4 дня лишь один фотон попадал в апертуру рентгеновского телескопа. Если предположить, что в других направлениях количество РИ такое же, как в исследованной области, то получаем оценку полного количества РИ  $\sim 6 \cdot 10^8$ .

Типичными представителями точечных источников являются рентгеновские пульсары. К июню 2003 число обнаруженных рентге-



новских пульсаров достигло 51. Периоды их пульсаций лежат в широких диапазонах: от 1.5 часа (4U 1700-37) до нескольких миллисекунд. Первый X миллисекундный пульсар был обнаружен ROSAT в 1992-м. Однако данных было недостаточно для его уверенной идентификации. Первым идентифицированным (в 1993) пульсаром оказался J0437-4715,  $P=5.75\text{ms}$ ,  $D=0.18$  кпс. Самым быстрым с 1982 по 2004 гг. считался пульсар B1937+21,  $P=1.55$  ms,  $D=3.6$  кпс,  $L\sim 10^{36}$  эрг/с. Однако в конце 2004-го на the Green Bank Telescope был обнаружен пульсар PSR J1748-2446ad с периодом 1.4 ms.

Излучение многих рентгеновских источников нестационарно. Формы проявления нестационарности могут быть различными. 4 апреля 1967 г в созвездии Центавра был обнаружен новый РИ, не уступающий по яркости Sco X-1. За этим источником, названным Cen X-2, были установлены регулярные наблюдения (7 запусков ракет). К 20 апреля яркость Cen X-2 достигла максимума и медленно пошла на убыль. Через 2 года в том же созвездии вспыхнул еще один РИ Cen X-4. В максимуме эти источники имели сравнимую яркость  $\sim 10^{-10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Если считать, что РИ испускается горячей прозрачной плазмой, то соответствующая рентгеновской оптическая яркость оценивается как  $12^m\text{-}13^m$ . Но в обоих случаях оптический аналог вспышки не был обнаружен.

Обнаруженные рентгеновские новые звезды были названными временными источниками или рентгеновскими транзиентами. Для надёжного установления их существования необходимы были спутниковые наблюдения. Однако спутники «Ухуру» не были ориентированы на обнаружение переменных РИ. Тем не менее, они зафиксировали два таких источника. Ситуация изменилась после запуска спутника «Ариэль». Программа обработки результатов наблюдения этого спутника была ориентирована на обнаружение временных источников. За год с небольшим было обнаружено 5 рентгеновских новых. Первая обнаруженная рентгеновская новая (A 1118-61) оказалась рентгеновским пульсаром с периодом 405 с. Длительность вспышки была  $\sim 10$  дней. Следующий временный источник A 05335+26 тоже оказался пульсаром с периодом 104 с. Этот источник оказался рекуррентным – его вспышки повторялись с не регулярным интервалом. Светимость новых рентгеновских звёзд в диапазоне энергий  $2\div 6$  кэВ составляла  $10^{37}\div 10^{38}$  эрг/с, а длительность вспышки от нескольких месяцев до недели.

Кроме рентгеновских новых наблюдались вспышки продолжительностью несколько часов. Однако самой быстрой переменностью блеска обладают рентгеновские барстеры – длительность вспышки у них десятки секунд.

Интересным событием явилось открытие мощного рентгеновского излучения квазаров и ядер активных галактик. Каталог лаборатории им. А. Эйнштейна насчитывает более 3000 дискретных рентгеновских источников. Предполагают, что это квазары, но оптически они пока не отождествлены. Рентгеновские светимости квазаров и ядер сейфертовских галактик в энергетическом интервале  $0.5 < E < 4.5$  КэВ лежат в пределах  $10^{43} < L < 10^{47}$  эрг/с. В рентгеновском диапазоне была найдена более быстрая переменность ( $10^4 \div 100$ с), чем в оптическом диапазоне ( $\sim 1$  месяц). Такой переменности соответствуют характерные размеры области излучения  $10^{12} \div 10^{14}$  см.

Были открыты протяженные источники рентгеновского излучения в скоплениях галактик. Самые мощные из них - скопления Волосы Вероники, Персея и Девы. Характерные размеры протяженных источников составляют 0,1-1 Мпк, а их светимость лежит в пределах  $10^{43}$ - $10^{45}$  эрг/с. Детальное исследование их спектров показало, что источником излучения является горячий межгалактический газ с температурой  $10^7$ - $10^8$  К. В спектре были обнаружены линии высокоионизированного железа Fe XXV и Fe XXVI, что указывает на галактическое происхождение горячего газа внутри скопления.

## 11. Гамма астрономия

Источниками космического рентгеновского излучения, как правило, являются также источниками гамма-излучения (ГИ). Спектр ГИ разделяется на четыре диапазона: мягкое ГИ ( $0.1 \div 5$  МэВ), среднее ( $5 \div 50$  МэВ), жесткое ( $50 \text{ МэВ} \div 10$  ГэВ), область сверхвысоких энергий ( $> 10$  ГэВ).

*Механизмы генерации:* аннигиляция, столкновения релятивистских протонов, ядерные процессы, тормозное излучение, синхротронное, комптонизация низко-энергичных фотонов (обратный эффект Комптона).

*Регистрация.* Мягкое ГИ регистрируется сцинтилляционными телескопами. Жесткое ГИ регистрируется телескопами, имеющими трековые детекторы. При энергиях ГИ  $> 10$  ГэВ наблюдать источни-

ки ГИ можно наземными средствами, наблюдая атмосферные ливни, создаваемые высокоэнергичными гамма-квантами.

## 11.1. Источники гамма излучения

К источникам гамма излучения относятся пульсары, остатки сверхновых, активные галактические ядра и блазары. (Stecker F.W. Cosmic physics the high energy frontier/arXiv:astro-ph/0309027).

Электромагнитное поле пульсаров способно ускорять электроны до релятивистских скоростей. В свою очередь движение релятивистских электронов в магнитном поле пульсара индуцирует синхротронное излучение. Максимум энергии синхротронного излучения приходится на значение частоты  $\nu \sim \nu_c \cdot \gamma^2$  ( $\nu_c$  – гирочастота нерелятивистских электронов,  $\gamma$  – лоренц-фактор). В магнитном поле пульсаров это значение частоты соответствует гамма излучению. Гамма кванты вызывают рождения электрон-позитронных пар. Окончательный спектр гамма-излучения пульсаров определяется синхротронным излучением и комптоновским рассеянием фотонов на релятивистских электронах и позитронах.

Гамма излучение в остатках сверхновых возникает в результате комптоновского рассеяния релятивистских электронов на реликтовом излучении.

*Блазары* – это квазары или активные галактические ядра. Они обладают следующими свойствами. 1) Выглядят как точечные оптические объекты. Иногда они окружены туманностями, но основное излучение исходит из точечного объекта. 2) Спектр их излучения более плоский, чем у звёзд, и линии поглощения в нём замыты. 3) Излучение частично поляризовано. 4) Излучение во всём диапазоне длин волн меняется быстрее с большими амплитудами вариаций, чем у обычных квазаров. 5) Значительную долю энергии блазары излучают в диапазоне энергий гамма фотонов. Если пик излучения попадает в полосу  $10\text{МэВ} \div 1\text{ГэВ}$ , то объекты называются красные блазары (LBL). Голубым блазарам (HBL) соответствует диапазон энергий  $1\text{ГэВ} \div 100\text{ГэВ}$ , а блазары с максимумом излучения в полосе  $200\text{ГэВ} \div 1\text{ТэВ}$  называются ТЭВ-блазарами.

Блазары были обнаружены в 1992-м детектором EGRET, установленном на космической обсерватории имени Комптона. К 1999 г. было зарегистрировано  $\sim 70$  LBL. Красное смещение излучения этих

объектов было ~2.4. Было открыто несколько ТэВ-блазаров с красным смещением меньшим ( $z < 0.13$ ),

## 11.2. Вспыхивающие гамма источники

Вспыхивающие гамма источники можно разделить на две группы: "Gamma-ray bursts" (GRBs) и Soft gamma repeaters (SGR) или мягкие повторяющиеся гамма всплески (МПГ). GRBs были открыты в конце 1960-х ИСЗ "Vela". Излучение приходило в случайные моменты времени со случайного направления. Знакомство с явлением SGR произошло в 1979.

SGR 0525-66. 5 марта 1979 г. станции Венера 11 в 10:51 U.T, а через 5 с Венера 12 зафиксировали гамма всплеск. Затем событие было зафиксировано американским кораблём Helios 2, ИСВ «Пионер», тремя ИСЗ Vela, ИСЗ станцией Прогноз 7 и космической рентгеновской обсерваторией «Эйнштейн» (ИСЗ). Длительность «жесткого» импульса не превосходила 0.2 с. Наблюдались колебания интенсивности с периодом 8 с и общей длительностью ~ 3 минуты. Энергия всплеска оценивается значением  $\sim 6 \cdot 10^{44}$  эрг. Спустя 40.5 часов, а затем 4 апреля и 24 апреля всплеск пришёл с того же направления. Следующие 4 года всплески наблюдались 16 раз, после чего прекратились. Источник всплесков находился в остатках SNR N49 в Большом Магеллановом Облаке.

Следующий МПГ (SGR 1627-41) был зафиксирован 18 июня 1998. Затем 27 августа 1998 была зафиксирована гигантская вспышка третий SGR 1900+14. Его энергия  $\sim 2 \cdot 10^{44}$  эрг. Повторные менее интенсивные вспышки наблюдались 29 августа, в апреле 2001 и ноябре 2002. 27 декабря 2004 наблюдалась гигантская вспышка SGR 1806-20. Источники последних трёх всплесков находились в нашей галактике.

Все 4 SGR были отождествлены с аномальными радиопульсарами (АРП). Периоды вращения у них были следующими: 8 с – SGR 0525-66, 6.4 с – SGR 1627-41, 5.2 с – SGR 1900+14, 7.5 с – SGR 1806-20.

3 ноября 2005 на российском приборе "Конус" (на борту американского спутника Wind) был зафиксирован всплеск GRB 0511-03. Направление прихода попадает в область, где находятся группа галактик M81/M82. Предполагается, что наблюдалась гигантская вспышка магнитара.

Понятие «магнитара» было введено Р. Дунканом и К. Томпсоном в 1992 г. Как предполагают эти исследователи, энергия на излучение МПГ черпается из энергии вращения и распада магнитного поля пульсара. Напряжённость магнитного поля магнитара оценивается значениями  $10^{14} \div 10^{15}$  Гс.

GRB впервые были обнаружены спутником Vela в 1967. В ранних исследованиях направление на источник находилось путём сопоставления интенсивностей излучения, приходящего на три детектора. Нормали к детекторам образовывали систему взаимно перпендикулярных векторов. Точность определения направления на источник излучения составляла несколько градусов.

Для определения длительности GRB используются параметры  $t_{50}$  (интервал времени, в пределах которого сосредоточено 50% энергии всплеска) и  $t_{90}$  (соответствует 90%). Согласно распределению гамма-всплесков по длительности они разделены на два класса: «короткие» –  $t_{90} < 1.5$  с (средняя продолжительностью около 300 миллисекунд), и «длинные» –  $t_{90} > 1.5$  с, с типичной длительностью от двух до 20 секунд (встречаются более протяженные – от минуты до получаса). Средняя энергия фотонов коротких GRB значительно превышает энергию «длинновспышечных» фотонов.

GRB – одно из самых таинственных явлений астрофизики. Первые 30 лет после их обнаружения отсутствовало единое мнение о механизме излучения GRB и месте нахождения их источников. Показательна в этом отношении обзорная статья [18], вышедшая в УФН в 1996. В статье представлены три гипотезы о месте нахождения источников GRB: Солнечная система, Галактика и Метагалактика.

Трудность решения проблемы местонахождения GRB определялась тем, что долгое время их источники не удавалось наблюдать в других диапазонах: рентгене, видимом и радио. 1997 год оказался поворотным в истории исследовании GRB. 28 февраля 1997 BEPOSAX удалось зафиксировать GRB 970228 с ранее не достижимой точностью. Благодаря этому телескопы Кек и Хаббл обнаружили его оптического двойника. Это оказалась удаленная галактика, на периферии которой и был обнаружен всплеск. Затем удалось оценить красное смещение GRB 970508 –  $z \sim 0.8$ .

Несколько месяцев спустя с беспредельной точность спутниками НАСА «Комптон», «Улисс» и «Росси» был зафиксирован GRB 970616. Все источники всплесков были далеко за пределами нашей

галактики. Наконец в конце года был обнаружен GRB 971214, красное смещение  $z=3.4$ .

Самое большое красное смещение  $z=6.295$  обнаружено у GRB 050904. Теоретики полагают, что это далеко не предельное значение красного смещения. Предполагается, что самые первые звёзды (население III типа) возникали при  $z>10$ . Эти звёзды были массивны и могли генерировать GRB, красное смещение которых могло находиться в интервале 10-100.

К настоящему времени не разработан аппарат, описывающий механизм GRB. Предложены гипотезы, согласно которым короткие GRB возникают в процессе слияния двух нейтронных звёзд. Длинные GRB могут происходить из-за слияния нейтронной звезды и белого карлика или в результате коллапса массивных звёзд.

## 12. Солнечная система

*Состав:* Солнце, 8 планет и их спутники (Плутон – тело, лишенное статуса планеты в 2006 г.), 46 планет карликов с диаметром от 400 км до 2400 км, малые тела, включающие кометы, астероиды и метеориты, межпланетная среда и межпланетное магнитное поле.

	масса %	масса г	Угловой момент в $10^{46} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$
Солнце:	99.85%	$2 \cdot 10^{33}$	170
Планеты:	0.135%	$2.7 \cdot 10^{30}$	31508
Кометы:	0.01% ?	$2 \cdot 10^{29}$	
Спутники планет:	$5 \cdot 10^{-7} \%$	$10^{27}$	
Малые планеты:	$2 \cdot 10^{-9} \%$ ?	$4 \cdot 10^{24}$	
Метеориты:	$10^{-9} \%$ ?	$2 \cdot 10^{24}$	
Межпланетная среда:	$10^{-9} \%$ ?	$2 \cdot 10^{24}$	
Земля:	$3 \cdot 10^{-6} \%$	$6 \cdot 10^{27}$	27

Выше приведены значения масс и угловых моментов объектов Солнечной системы. Убедительного объяснения причины возникновения большого отношения угловых моментов планет и Солнца при малом отношении их масс до сих пор не предложено

## 12.1. Планеты

По физическим параметрам и положению в Солнечной системе планеты делятся на две группы: *планеты земной группы* и *планеты гиганты*. В земную группу входят Меркурий, Венера, Земля и Марс. К планетам гигантам относятся Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. К началу 2004 г. Известно 136 спутников планет. Земля имеет один спутник – Луну, Марс – 2 спутника, Юпитер – 61, Сатурн – 31, Уран – 27, Нептун – 13, Плутон – 1.

*Земля.* Масса  $m_{\oplus}=6 \cdot 10^{27}$  г., большая полуось орбиты – а. е.=1.5  $10^{13}$  см. Эффективная температура поверхности – 287 К. Магнитный момент  $\mu=8 \cdot 10^{25}$  Гс см<sup>3</sup>. Альбедо – 0.39. Один спутник – *Луна*.

*Меркурий* – масса 0.05  $m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 0.39 а. е.. Альбедо – 0.1. У Меркурия обнаружено магнитное поле напряженностью 1% относительно Земного поля, с наклоном оси диполя к оси вращения планеты 7 градусов. Источник магнитного поля неизвестен. Меркурий считается самой старой и маленькой планетой. Его ядро должно быть твердым, и поэтому генерация магнитного поля считается невозможной. Поверхность Меркурия подобно Лунной поверхности покрыта кратерами.

*Венера* – масса 0.89  $m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 0.72 а.е. Альбедо – 0.65. Поверхность геологически относительно молода, состоит из обширных равнин, покрытых потоками лавы и горными регионами, деформированными геологической деятельностью. Вопрос о наличии собственного магнитного поля у Венеры дискуссионный. Напряженность магнитного поля на поверхности Венеры ~10γ, сравнима со средней напряженностью ММП (7 γ□). Атмосфера плотная и горячая – давление  $P=92$  бар, температура  $T=755$  К.

*Марс* – масса 0.11  $m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 1.52 а. е. Альбедо – 0.15.  $P=0.007$  бар,  $T_{min}=-140^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{max}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\langle T \rangle=-63^{\circ}\text{C}$ . Магнитное поле – дипольное ~60 γ. Имеется два спутника: Фобос и Деймос.

*Планеты гиганты. Юпитер* – масса 318  $m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 5.2 а. е. Альбедо – 0.52.  $P=0.7$  бар,  $\langle T \rangle=-121^{\circ}\text{C}$ . Магнитный момент  $\mu=1.35 \cdot 10^{30}$  Гс см<sup>3</sup>. Аномально высокий тепловой поток – равен потоку, получаемому от Солнца. Известны 61 спутник. В 1979 Voyager 1 обнаружил пылевое кольцо.

*Сатурн* – масса 95.2  $m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 9.54 а. е.  $P=1.4$  бар,  $\langle T \rangle=-125^{\circ}\text{C}$ . Магнитный момент  $\mu=4 \cdot 10^{28}$  Гс см<sup>3</sup>. Альбедо

– 0.47. Имеет 18 именованных спутников и более дюжины неименованных. Знаменит наличием системы колец.

*Уран* – масса  $14.5 m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 19.2 а. е.  $P=1.4$  бар,  $\langle T \rangle = -125^{\circ}\text{C}$ . Магнитный момент  $\mu = 4 \cdot 10^{28} \text{ Гс см}^3$ . Альbedo – 0.51. Имеет более двадцати спутников и систему колец, расположенных на расстояниях от 38 000 км до 51 000 км. Позади планеты обнаружен магнитосферный «хвост» в форме штопора. Природа магнитного поля неизвестна.

*Нептун* – масса  $17.2 m_{\oplus}$ , большая полуось орбиты – 30.1 а. е.  $P=1-3$  бар,  $\langle T \rangle$  от  $-193^{\circ}\text{C}$  до  $-153^{\circ}\text{C}$ . Альbedo – 0.41. Известно 8 спутников.

Плоскость орбиты Меркурия наклонена к эклиптике под углом  $7^{\circ}$ , для орбиты Венеры этот угол равен  $3.4^{\circ}$ . Орбиты остальных 6 планет расположены в пределах двух градусов относительно эклиптики.



Рис. 4 Средняя плотность планет как функция удаления от Солнца.

Интересной отличительной особенностью планет гигантов от планет земной группы является низкая плотность вещества, из которого они состоят.

## 12.2. Пояс Койпера

Область Солнечной системы за орбитой Нептуна, населенная небольшими объектами называется *поясом Койпера*. Название присвоено поясу в честь американского астронома Джерарда Койпера (1905-1973), который в 1951 г. высказал предположение, что за орбитами планет-гигантов, на расстоянии 35-50 а. е. от Солнца существует "пояс" – источник короткопериодических комет. Справедливости ради, следует сказать, что за два года до Койпера подобное предположение делалось английским астрономом Кеннетом Эджворт. Поэтому иногда употребляется название пояса Эджворта-Койпера.

Первый объект пояса Койпера диаметром около 280 км был открыт в 1992 г. и получил обозначение 1992 QB1. К маю 2000 г. было



открыто уже 270 транснептуновых объектов. Все они обращаются вокруг Солнца в прямом направлении (как большие планеты). По параметрам орбит их разделили на несколько классов: - *классические объекты* пояса Койпера; их почти круговые орбиты лежат в области 40-50 а. е. от Солнца, а плоскости орбит наклонены к эклиптике менее чем на  $40^\circ$ ; - *рассеянные объекты*, имеющие вытянутые орбиты (эксцентриситет  $e=0.5-0.9$ ) с большой полуосью 60-100 а. е.; некоторые из них удаляются от Солнца в афелии на 100-200 а. е., а объект 2000 CR105 - даже на 1300 а. е.

Объекты за Нептуном пока трудно отнести к какому-либо классу малых тел Солнечной системы - к астероидам или ядрам комет. Новооткрытые тела имеют диаметр 100-1000 км и очень темную красноватую поверхность, что указывает на ее древний состав и возможное присутствие органических соединений. Согласно оценкам, в поясе Койпера около 70000 объектов с диаметрами более 100 км.

### 12.3. Кометы

*Кометы* - тела Солнечной системы, имеющие вид туманных объектов, обычно со светлым сгустком-ядром в центре и хвостом. Маленькое ядро размером несколько километров является единственной твердой частью кометы, и в нем практически сосредоточена вся ее масса. Вдали от Солнца у комет нет никаких атмосфер, и они ничем не отличаются от обычных астероидов.

При сближении с Солнцем на расстояние  $\sim 11$  а. е. у кометы сначала появляется кома (рис. 5). В телескоп такая комета наблюдается как туманное пятнышко, и ее можно отличить по виду от какого-нибудь удаленного звездного скопления только по заметному собственному движению. Затем, на расстояниях 3-4 а. е. от Солнца у кометы под действием солнечного ветра и межпланетного магнитного поля начинает развиваться хвост, который становится хорошо заметным на расстоянии менее 2 а. е.

В XVI в. астроном Тихо Браге показал, что кометы находятся далеко за пределами земной атмосферы и даже гораздо дальше, чем спутник Земли – Луна; что они движутся в пространстве примерно на таком же большом расстоянии от Земли, как и планеты.

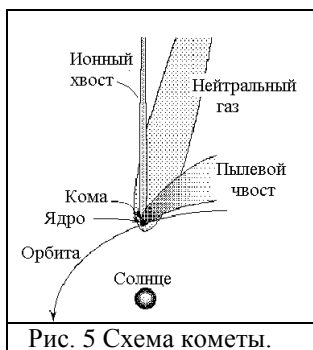


Рис. 5 Схема кометы.

Неоценимый вклад в кометную астрономию внёс Эдмунд Галлей [19]. Галлей в 1704 г. предсказал, что комета 1682 г. вновь появится в 1758 году или в начале 1759. Галлей не дожил 17 лет до предсказанного им появления кометы. Его исследования нашли продолжения в работах Алексиса Клеро, который для расчёта траектории кометы Галлея разработал алгоритм численного решения задачи трех тел. В октябре 1758 г. Клеро представил Парижской Академии наук

мемуар о движении кометы Галлея и предстоящим её появлением. Согласно расчетам комета будет в перигелии в середине октября 1759 г. Комета появилась на месяц ранее предсказанного срока. Честь первооткрывателя досталась любителю-астроному крестьянину Г.Паличу, обнаружившего комету в рождественскую ночь 25 декабря 1758 г. в подзорную трубу.

*Размеры, масса.* Считается, что массы ядер комет заключены в интервале  $10^{13} \text{ г} \div 10^{19} \text{ г}$ . Непосредственно оценить массу кометы чрезвычайно трудно. Фактически до сих пор это не было сделано. Казалось бы, можно оценить массу кометы по величине возмущения траектории космического аппарата, пролетающего мимо кометы. Однако даже грубые оценки указывают, что эти возмущения весьма малы, чтобы быть зафиксированными.

Можно оценить массу кометы по теореме вириала, если она разделяется на фрагменты. Например, в 1957 г. ядро кометы Виртанена разделилось на два фрагмента, удаляющихся друг от друга со скоростью 1,6 м/с. Для массы  $\sim 10^{17} \text{ г}$ . радиальная скорость 1,6 м/с на удалении 4 км от ядра кометы является параболической. Идеальным способом взвешивания кометы можно считать создание у неё спутника.

*Механизм свечения* кометных молекул был разгадан П.Н. Лебедевым в 1911 г. - это резонансная флюоресценция, которая является частным случаем общего механизма люминесценции. Одновременно с Лебедевым к такому же выводу пришли К. Шварцшильд и Е. Крон. Молекулы или атомы комет поглощают фотоны солнечного света, соответствующие их уровням возбуждения, а затем излучают фотоны этой же частоты, изменяя лишь направление излучения (и часто-

ту, за счёт доплер-эффекта). Последнее время есть результаты, указывающие на наличие рентгеновского излучения, источником которого является полусфера головы кометы, обращенная к Солнцу. Рентгеновское излучение к настоящему времени обнаружено у 10 комет. Первой в этом списке оказалась комета Хиакутаке

Самая яркая часть кометы - это «голова». Она похожа на сгущенное, туманное облачко, яркость которого увеличивается к середине. Здесь иногда бывает видно «ядро» головы кометы, похожее на звездочку. Из головы кометы выходит в виде слабой светящейся полосы «хвост». Пока комета находится вдали от Солнца, она не имеет никакого хвоста. Хвост появляется и начинает расти по мере приближения кометы к Солнцу, причем он обычно направлен в сторону от Солнца.

Хвосты комет формируются силами гравитационного притяжения со стороны Солнца, действием газового давления солнечного ветра и давлением света. Не последнюю роль в формировании хвостов играет межпланетное магнитное поле. Лебедев предложил и экспериментально доказал существование силы давления света. Бредихин на 60 лет ранее, чем был открыт солнечный ветер, предполагал, что Солнце кроме света испускает корпускулярные частицы. Хвосты могут иметь разную форму, которая зависит от природы частиц, его составляющих. Плотность кометного хвоста ничтожна, так как состоит он только из разреженного светящегося газа и пыли. При сближении кометы с Солнцем хвост может разделиться, приобретая сложную структуру. Голова же кометы увеличивается до максимального размера на расстояниях 1,6-0,9 а. е., а затем уменьшается. Длина хвоста может превосходить а. е., но может быть короткой (несколько миллионов км).

Кометы делят на два основных класса в зависимости от периода их обращения вокруг Солнца. *Короткопериодическими* называют кометы с периодами обращения менее 200 лет, а *долгопериодическими* – с периодами более 200 лет. Совсем недавно можно было наблюдать яркую долгопериодическую (с периодом около 4000 лет) комету Хейла-Боппа, которая впервые появилась в ближних окрестностях Солнца. Сейчас уже обнаружено около 2000 долгопериодических комет, из которых более половины имеют маленькие перигелийные расстояния и называются "царапающими" Солнце кометами (Kreutz sungrazers). С помощью Интернета профессиональные астрономы и астрономы-любители могут наблюдать и открывать кометы благодаря коронографу, установленному на борту SOHO. Ко-

ты, открытые с помощью этих инструментов, называют кометами SOHO. В июле 2007 была открыта комета SOHO-1343 (здесь 1343-порядковый номер из списка комет, открытых SOHO).

Наклоны орбит долгопериодических комет по отношению к плоскости эклиптики распределены случайным образом.

Короткопериодических комет сейчас известно более 200. Как правило, их орбиты расположены очень близко к плоскости эклиптики. Все короткопериодические кометы являются членами разных кометно-планетных семейств.

Голландский астрофизик Ян Оорт, проанализировав распределение орбит известных в то время 19 долгопериодических комет, обнаружил, что большие полуоси их первичных орбит группируются к области, удаленной на расстояния более 200000 а. е.. Оорт предположил, что Солнечная система окружена гигантским облаком кометных тел или ледяных планетезималей (по его оценке насчитывающим до  $10^{11}$  тел), находящихся на расстояниях от  $2 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^5$  а.е.. В 1950 г. Оорт исходил из предположения о том, что эти тела были "заброшены" на такие расстояния в результате взрыва гипотетической планеты (которая раньше якобы существовала на месте современного главного пояса астероидов). Однако уже в 1951 г. он перешел к представлениям, совпадающим с выводами представителей шмидтовской школы, которые показали, что в процессе роста планет-гигантов (в первую очередь Юпитера и Сатурна), при достижении ими достаточно большой массы их гравитационные возмущения становятся настолько сильными, что начинается массовый выброс ими более мелких первичных тел (планетезималей) из ближайших к их орбитам кольцевых зон. Этот процесс не только повлиял на пояс астероидов и планеты земной группы, но заодно мог создать на периферии Солнечной системы резервуар кометных тел, из которого они приходят сейчас. Это кометное облако в дальнейшем стали называть "облаком Оорта".

*Устройство комет.* Почти два века назад Лаплас, а после него Бессель выдвигали гипотезы о ледяном устройстве комет. В настоящее время признанной считается модель кометных ядер, предложенная Ф. Уипплом в 1950-м году и усовершенствованная П. Свингом и А. Дельземом в 1952-м. Согласно этой модели ядро кометы представляет собой очень рыхлое образование, типа гигантского снежного кома из комков гидратов льдов разного состава (воды, аммиака, метана и углекислого газа) смерзшегося с пылью и отдельными фрагментами горных пород. Возрастание блеска кометы объ-

ясняется ее нагреванием при сближении с Солнцем и потерей массы ее ядром. Чем ближе к Солнцу подходит комета, тем она ярче и тем длиннее ее хвост. Некоторые хвосты достигают в длину расстояния от Земли до Солнца, а голова кометы - размеров Солнца. С удалением от Солнца вид и яркость кометы меняются в обратном порядке, и комета исчезает из вида, достигнув орбиты Юпитера.

*Активные кометы.* Классический сценарий: по мере приближения к Солнцу появление комы, затем хвоста часто нарушается активными кометами. Активность комет проявляется в возникновении галосов и джетов. На создание галосов требуется энергия  $10^{21}$ - $10^{23}$  эрг.

Механизм создания джетов и галосов не ясен. Отмечено, что активность комет коррелирует со временем пересечения ими секторной структуры межпланетного магнитного поля. Интересно, что активные явления начинают возникать на больших расстояниях от Солнца  $\sim 3$  а. е.

В марте 1986 г космические аппараты "ВЕГА-1 и ВЕГА-2" (СССР) и аппарат "Джотто" (Европейское космическое агентство), сблизившись с кометой Галлея. В тот момент масса ядра кометы была близка к  $6 \cdot 10^{17}$  г. Тогда были получены и другие чрезвычайно интересные результаты. Было обнаружено, что ядро кометы Галлея представляет собой тело, напоминающее по форме арахис. Размер этого тела вдоль большой оси был равен примерно 14 км, а вдоль двух малых осей - примерно по 7,5 км. Ядро кометы вращается вокруг малой оси с периодом равным 53 ч. Температура поверхности кометы на ее расстоянии 0,8 а. е. от Солнца была примерно равна 360 К или  $87^\circ$  по Цельсию.

Поверхность ядра кометы оказалась очень темной и отражает только 4% падающего на него света. Для сравнения напомним, что поверхность Луны в среднем отражает 7%, а поверхность Марса 16% падающего света. Скорее всего, ледяное тело кометы покрыто теплоизолирующим слоем из тугоплавких частиц (металлов, серы, кремния, их окислов и других соединений), существование которого предполагал Уиппл в своей модели. Там где лед тает, струи водяного пара, углекислого и других газов вместе с пылью вырываются из-под корки. Было подсчитано, что в момент прохождения перигелия комета за каждую секунду теряет около 45 т газообразных соединений и 5-8 т пыли. По оценкам запасов летучего вещества комете Галлея должно хватить на сотню тысяч лет.

*Основные результаты*

Вода составляла приблизительно 80 % объема всего материала, выброшенного кометой. Были обнаружены существенные количества угарного газа (10 %), углекислого газа (2.5 %), метана и аммиака, а также следы других элементов: углеводов, железа и натрия. Поверхность ядра очень темна - более черная, чем уголь - предположительно толстый слой пыли. Альbedo ~4%. Поверхность ядра очень нерегулярна. Ядро имеет пористую структуру, с плотностью  $\sim 0.3 \text{ г/см}^3$ .

Обнаружено 7 джетов, выбрасывающие около 3 т/с вещества и придающие комете стабилизирующее ориентацию вращение, которое, кажется, устойчивым на столетия или даже тысячелетия. Большинство пылинок имело чрезвычайно малые размеры. Наибольшее обнаруженное зерно было 40 мк, хотя масса большой частицы, которая пробил космический корабль, оценивается от 0.1 до 1 грамма.

Максимальное значение напряженности магнитного поля, измеренное Джото в близи ядра кометы, оказалось  $\sim 80 \text{ нТл}$ .

## 12.4. Солнце

Общие сведения о Солнце:

Масса	$2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Радиус	696 000 км
Средняя плотность	$1,4 \text{ г/см}^3$
Светимость	$3,86 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$
Видимая звездная величина	$-26,75^m$
Спектральный класс	G2 V

Общая структура Солнца	Наружная граница	Температура, К
Ядро	- $0.25 R_{\odot}$	$2 \cdot 10^7$
Зона лучистого переноса	- $0.8 R_{\odot}$	$10^6 \div 10^7$
Конвективная зона	- $R_{\odot}$	$10^4 \div 10^6$
Толщина слоя, км.		
Фотосфера	- 300 ÷ 500	$4300 \div 10^4$
Хромосфера	- 2500	$10^4 \div 5 \cdot 10^4$

*Спектр Солнца* непрерывный в нем наблюдается множество темных *фраунгоферовых* линий. Фраунгофер был первым, кто опи-

сал темные линии на фоне непрерывного спектра в 1814 году. Эти линии в спектре Солнца образуются в результате поглощения квантов света в более холодных слоях солнечной атмосферы.

В видимой и инфракрасной областях спектр электромагнитного излучения Солнца близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой 6000 К. Около 9 % энергии в солнечном спектре приходится на ультрафиолетовое излучение с длинами волн от 100 до 400 нм. Остальная энергия разделена приблизительно поровну между видимой (400–760 нм) и инфракрасной (760–5000 нм) областями спектра. Плотность потока излучения Солнца в рентгеновской области (0,1–10 нм) весьма мала ( $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup> при 1 а. е.) и сильно меняется с изменением уровня солнечной активности. Распределение источников РИ по диску Солнца неоднородно.

*Фотосфера* – оптически самый плотный слой атмосферы Солнца, испускающий основную долю энергии оптического излучения. Фотосфера гранулирована. Типичный диаметр гранулы: 700–1500 км. Расстояние между центрами гранул  $\sim 1800$  км. Среднее время жизни гранулы  $\sim 8$  мин. Наряду с грануляцией в фотосфере имеет место супергрануляция. Границы супергранул проявляются в виде яркой фотосферной сетки и заметно выделяются в хромосфере местами концентрации магнитных потоков. Размеры ячеек супергранул  $\sim 30\,000$  км, формы ячеек неправильные. Время существования – 1–2 суток.

*Фотосферное магнитное поле* неоднородно. Оно состоит из маленьких элементов, находящихся в постоянном движении и быстро развивающихся. Мелкомасштабные структуры образуют крупномасштабные: 1) солнечные пятна, 2) активные области, 3) крупномасштабные униполярные области, 4) супергнауляционные поля, 5) эфемерные области.

*Солнечные пятна* могут наблюдаться через закопченное стекло даже невооруженным глазом. Диаметр среднего пятна составляет  $\sim 0,1$  радиуса Солнца. Основные элементы пятна: тень и полутень. Диаметр тени от 10000 до 20000 км. Плотность потока излучения в тени существенно ниже, чем в фотосфере. Она составляет  $\sim 5\%$  в видимой части спектра и возрастает до 60% в далёком ИК диапазоне. Яркость пятна не является однородной. В пятне наблюдаются яркие точки с диаметром менее 200 км. Яркость этих точек сравнима с яркостью фотосферы вне пятен. Эти точки движутся вверх со скоростью 0,5 км/с. Время их жизни  $\sim 1500$  с.

Напряженность поля в тени однородна, в центре пятна вертикально, напряженность поля 2000-3000 Гс, может достигать 4000 Гс. Магнитный поток большого пятна  $10^{21}$  Мкс. Поток от группы пятен 2  $10^{22}$  Мкс. Эффективная температура пятна 3700 К. «Поверхность» пятна расположена на 300 км ниже уровня фотосферы

Тень окружена полутенью, состоящей из светлых и темных радиальных волокон длиной 5000-7000 км и шириной 300-400 км. Яркость светлого волокна 95% яркости фотосферы, тогда как яркость темных полос 60 %. Яркие волокна состоят из цепочки ярких зерен. Зерна формируются в полутени и движутся в направлении пятна. Время их жизни колеблется от 40 мин до 3-х часов.

Понижение давления в направлении от полутени к тени определяется наличием радиальных потоков вещества, которые названы потоками Эвершеда (в честь исследователя, обнаружившего это эффект век назад). В хорошо развитом пятне поток течет наружу вдоль темных волокон полутени. Более слабый встречный поток наблюдается вдоль светлых волокон, которые движутся вверх относительно светлых волокон. В хромосфере над пятном направление потоков Эвершеда меняется на противоположное.

*Развитие пятен.* Сначала в центре супергранул происходит всплытие магнитного потока в виде системы арочных волокон. В течение нескольких часов (3-5) основания волокон мигрируют к границе ячейки. Наблюдается тенденция их концентрации в месте стыка трех супергранул, где в течение ~ 45 минут образуется *пора*. Размер поры 700-4000 км. Её яркость на 50% ниже яркости фотосферы. Полутени нет. Часто поры живут несколько часов или суток, а затем исчезают. Иногда же они превращаются в маленькие пятна, размеры которых увеличиваются в течении 3-10 суток, за счёт присоединения магнитных потоков магнитных узлов, движущихся к пятну со скоростью от 0,25 до 1 км/с. Большинство пятен исчезают в течение суток. Но некоторые существуют в течение нескольких оборотов Солнца. При разрушении пятна наблюдаются движения от него магнитных узлов, уносящих часть магнитного потока пятна.

Пятна чаще всего появляются группами. Пятна в группе концентрируются вокруг двух пятен: ведущего (западного) и замыкающего (восточного). Как правило, ведущее и ведомое пятна имеют противоположные полярности. По мере развития группы расстояние между пятнами в паре увеличивается, достигая 150 000 км (пятая часть радиуса Солнца). 53% групп пятен биполярны. 46% пятен униполярны, и лишь 1% имеют сложную полярную структуру.



*Бабочки Маундера.* Число и площадь солнечных пятен меняются. В качестве количественной меры солнечной активности часто используются числа Вольфа, которые определяются согласно выражению  $W=K(10g+f)$ , где  $g$  – число групп пятен,  $f$  – число пятен,  $K$  – множитель подобия (подбирается так, чтобы согласовать временные ряды чисел Вольфа, полученные различными наблюдателями). В 1843 г. Швабе после 20 лет исследований обнаружил периодичность численности солнечных пятен. Обнаруженная Швабом периодичность не является строгой. Интервалы, между соседними циклами варьируются от 10 до 14 лет. Тем не менее цикл пятнообразования называется 11-и летним, хотя корректней его называть 22-летним. Два соседних одиннадцатилетних цикла отличаются друг от друга полярностью ведущих пятен. Причём, наблюдается асимметрия между южным и северным полушарием Солнца: полярности ведущих пятен в них имеют противоположные знаки.

Пятна встречаются в двух зонах параллельных экватору. Сначала они появляются в окрестности широты  $\pm 35^\circ$ . Затем начинают дрейфовать к экватору. Эта закономерность была обнаружена в 1858 г Р. К. Кэррингтоном. Маундер построил диаграмма расположения пятен в координатах широта – время. По форме диаграмма похожа на бабочки, поэтому называется «Бабочки Маундера».

*Факела.* Пятна, даже самые маленькие, всегда встречаются в факелах. Факелы имеют вид ярких образований в окрестности пятен. Их площадь примерно в четыре раза больше площади соответствующих им групп пятен. Яркость на  $\sim 40\%$  выше яркости фотосферы. Факела представляются сетью из расположенных в цепочку элементов (диаметром от 5000 до 10000 км). Длина цепочки 50 000 км. Продолжительность жизни факельных гранул несколько минут, тогда как сами факелы существуют дольше соответствующих им пятен. Факелы, не связанные с пятнами, мельче и живут меньше. Если факел ярк, то пятно или было, или появится.

*Активные области.* Активные области образуются в результате быстрого всплывания больших потоков магнитного поля. Пятна и факела не являются единственными отличительными атрибутами активных областей. Когда из-под фотосферы появляется новый магнитный поток, атмосфера нагревается и образуется яркая рентгеновская точка. Большинство ярких точек менее чем через сутки исчезают, но часть из них превращается в активную область. Большинство активных областей имеют биполярную структуру. Между структурами четко просматривается разделяющая их нейтральная линия.

Область, где нейтральная линия имеет S-образный вид (именуются «сигмоидами»), является особенно активной. Здесь происходят солнечные вспышки и корональные выбросы массы.

*Солнечные вспышки* происходят в результате аннигиляции магнитного поля, энергия которого трансформируется в тепловую и энергию кинетического движения плазмы. Проявляется вспышка в виде резкого увеличения электромагнитного излучения в широкой полосе частот (от радио волн до  $\gamma$  излучения). Вспышка сопровождается корпускулярным излучением. Длительность вспышки в рентгеновском диапазоне от десятка секунд до нескольких минут. Мощность излучения  $10^{26}$  эрг/с.

Некоторые особенно мощные вспышки сопровождаются корональными выбросами масс (КВМ). При КВМ из нижней короны ускоренно в радиальном направлении выбрасывается сгусток замagnetизированной плазмы. Скорость КВМ при 1 а. е. порой превосходит 1000 км/с. Масса  $10^{15}$ - $10^{16}$  г. Плазменная бета (отношение кинетического давления плазмы к магнитному) в КВМ меньше единицы. КВМ, движущаяся в направлении Земли, вызывает магнитные бури, полярные сияния и другие возмущения в магнитосфере Земли.

*Протуберанцы.* Другим проявлением солнечной активности является появление в короне Солнца протуберанцев. Плотность и температура протуберанцев такая же, как и вещества хромосферы, но на фоне горячей короны протуберанцы – холодные и плотные образования. Температура протуберанцев около 20 000 К. Некоторые из них существуют в короне несколько месяцев, другие, появляющиеся рядом с пятнами, быстро движутся со скоростями около 100 км/с и существуют несколько недель. Отдельные протуберанцы движутся с еще большими скоростями и внезапно взрываются; они называются *эруптивными*. Размеры протуберанцев могут быть разными. Типичный протуберанец имеет высоту около 40 000 км и ширину около 200 000 км. Дугообразные протуберанцы достигают размеров 800 000 км.

*Корональные петли и арки* высотой в сотни тысяч километров состоят из отдельных тонких петелек, скрученных друг с другом, как нити в веревке. Выбросы плазмы из глубинных слоев Солнца, согласно последним исследованиям, являются основной причиной разогрева солнечной короны.

*Хромосфера* Солнца видна только в моменты полных солнечных затмений. Луна полностью закрывает фотосферу, и хромосфера вспыхивает, как небольшое кольцо ярко-красного цвета, окруженное

жемчужно-белой короной. Хромосфера получила свое название именно из-за этого явления (греч. «окрашенная сфера»). Размеры хромосферы 10–15 тысяч километров, а плотность вещества в сотни тысяч раз меньше, чем в фотосфере. Температура в хромосфере быстро растет, достигая в верхних ее слоях десятков тысяч градусов. На краю хромосферы наблюдаются выступающие язычки пламени – *хромосферные спикулы*, представляющие собою вытянутые столбики из уплотненного газа. Температура этих струй выше, чем температура фотосферы.

*Спикулы.* Спикулы выбрасываются вдоль силовых линий магнитного поля в окрестности границ супергранул. Диаметр спикулы 500–1200 км, а высота достигает 11000 км. Время жизни 5–10 минут. После начального ускорения скорость подъема спикулы достигает 20–30 км/с и остаётся постоянной до её исчезновения. Электронная плотность  $3 \cdot 10^{10}$ – $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Температура внутри спикулы 10000–20000 К.

*Корона* – самая внешняя, самая разреженная и самая горячая часть солнечной атмосферы. Она прослеживается от солнечного лимба до расстояний в десятки солнечных радиусов. Корона имеет температуру около миллиона градусов и состоит из высоко ионизированного газа. Из-за малой оптической толщины яркость короны в миллионы раз меньше, чем фотосферы, поэтому корону можно видеть только во время полного солнечного затмения, либо с помощью коронографа. Наиболее яркую ее часть принято называть *внутренней короной*. Она удалена от поверхности Солнца на расстояние не более одного радиуса. *Внешняя корона* Солнца имеет протяженные границы и простирается на расстояния ~100 а. е.

*Солнечный ветер*, являющийся продолжением внешних слоев солнечной атмосферы – солнечной короны. Вблизи Земли его скорость составляет обычно 400–500 км/с. Благодаря космическим исследованиям было установлено существование быстрого и медленного солнечного ветра. Быстрый солнечный ветер истекает из высокоширотных областей Солнца. Его скорость 1000 км/с, плотность ~ 1 протон/см<sup>3</sup>.

Первые измерения медленного солнечного ветра произведены в 1959 году на АМС «Луна-9». В 1962 году «Маринер-2», направлявшийся к Венере, произвел наблюдения солнечного ветра и получил следующие результаты: скорость солнечного ветра изменялась в границах от 350 м/с до 800 м/с, средняя концентрация солнечного ветра ~6 протонов на 1 см<sup>3</sup>, ионная температура 160000 К. Плазма

солнечного ветра вмерзла в межпланетное магнитное поле, средняя напряженность которого на орбите Земли  $6 \cdot 10^{-5}$  эрстед. Трактории движения частиц солнечного ветра в среднем радиальны. В результате вращения Солнца магнитное волокно, в котором локализуется плазма солнечного ветра, имеет форму спирали Архимеда

## 12.5. Космогония

*Космогония* – это раздел астрономии, занимающийся изучением происхождения и эволюции звёзд и планет. Ранее этот термин распространялся только на Солнечную систему. Над проблемой происхождения Земли, Солнца, планет и звёзд люди задумывались с давних времён. Но эти размышления не были подкреплены наблюдениями. Становление космогонии как науки началось с появления телескопа. Достаточно обширный список имен людей, оставивших свой след в постановке и решении проблем космогонии, можно найти в монографии Сурдина В. Г. и Ламзина С. А. «Протозвёзды» [20].

Первой «базой данных», стимулирующей появление космогонических гипотез, был каталог туманностей Ш. Мессье. Если каталог Мессье содержал 103 объекта, то в каталогах В. Гершеля число туманностей превышало 2500. Опираясь на результаты наблюдений Гершеля, П. Лаплас выдвинул гипотезу о возникновении Солнечной системы [21]. Впоследствии эта гипотеза фигурировала под наименованием «небулярная гипотеза Канта-Лапласа». И. Кант опубликовал свою гипотезу анонимно, и она не была известна широкому кругу читателей. Лаплас свою гипотезу поместил как приложение к своей «Системе мира». Суть небулярной гипотезы заключается в идее, что звёзды и планеты формируются под действием гравитационного притяжения из газовых туманностей.

Гипотеза Лапласа была умозрительной. Она не содержала математического формализма и основывалась лишь на визуальных наблюдениях. Лишь спустя более полувека появится фотография, спектрография. Основы математического аппарата космогонии были заложены английским астрофизиком Джеймсом Джинсом на рубеже XIX и XX веков. Его теория гравитационной неустойчивости позволяла объяснить происхождение галактик, звезд и планетных систем из газовых неоднородностей различных масштабов.

Джинс считал, что наша планетная система возникла из вещества Солнца, вырванного из него пролетающей мимо звездой. Одна-

ко при детальном рассмотрении выяснилась несостоятельность этой гипотезы, поэтому астрофизики вернулись к гипотезе Лапласа.

В 40-х годах прошлого столетия была популярной гипотеза О. Ю. Шмидта, согласно которой образование планет происходило из газопылевого облака в два этапа. На первом этапе из пылевого компонента образуются тела с размерами сотни километров. На втором этапе эти тела, движущиеся по близким орбитам, сливаются в планеты.

Теория Шмидта не объясняла происхождение газопылевого диска. Кроме того, это была качественная теория. В 60-х гг. появились первые приближенные количественные теории совместного образования Солнца и протопланетного облака (Ф. Хойл, Великобритания, 1960 г.; А. Камерон, США, 1962 г.; Э. Шацман, Франция, 1967 г.).

Одним из окончательно нерешенных вопросов планетной космогонии является проблема моментов – почему угловой момент Солнца, масса которого составляет 99.85% массы всей Солнечной системы, имеет угловой момент в 185 раз меньший суммарного углового момента планет?

Шведский астрофизик Х. Альвен [22] указывает, что до сих пор не представлено убедительных доказательств, что звёзды образуются в межзвёздных облаках в результате действия механизма гравитационной неустойчивости Джинса. Альвен оспаривает бытующее мнение, «что магнитогидродинамические эффекты противодействуют сжатию космического облака». И предлагает модели, «в которых электромагнитные силы способствуют сжатию».

Хойл и Шацман использовали идеи Альвена для решения проблемы моментов. По их мнению, протосолнце обменивалось угловым моментом с протопланетным облаком за счёт магнитного «сцепления». Однако в целом теория Альвена формирования звёзд и планет при активном участии электромагнитных сил до сих пор не нашла последователей.

Наблюдения указывают, что звёзды рождаются в облаках с массой  $\sim 10^5 M_{\odot}$ . Современная космогония опирается на компьютерное моделирование процессов конденсации звезд из межзвездных облаков. Магнитные поля в этих моделях не играют решающей роли. Проблема моментов решается путем учёта турбулентности в процессах формирования звёзд и их планетных систем. Считать, что космогония, как наука, близка к завершению, нет никаких оснований. До сих пор не предложено убедительного механизма образования комет. Не предложено механизма образования межзвёздных об-

лаков. Нет экспериментальных подтверждений, что аккреция играет определяющую роль в формировании звезд. Альтернативная гипотеза, что звёзды рождаются в результате распада компактных объектов, даже не рассматривается.

### 13. Космология

*Космология* изучает происхождение и эволюцию нашей Вселенной в целом. Данные получают обычными астрофизическими методами, исследуя реликтовое микроволновое излучение, наблюдая в различных диапазонах длин волн распределение галактик и скоплений галактик. Для Вселенной в целом строятся *космологические модели* - логически непротиворечивые схемы, основанные на современных теоретических представлениях о свойствах пространства-времени (теория гравитации) и элементарных частицах, описывающие всю совокупность известных наблюдательных фактов о Вселенной с минимумом произвольных допущений.

Прежде чем обсуждать космологические модели имеет смысл перечислить основные наблюдаемые данные, используемые при разработке моделей.

*Разбегание галактик, закон Хаббла.* В начале 20-х прошлого столетия по наблюдениям цефеид в туманности Андромеды Хаббл доказал, что эта туманность является галактикой. Он предложил систему классификации галактик. В 1929 открыл закон, согласно которому скорость удаления галактик пропорциональна расстоянию до них. Хаббл разработал и реализовал обширную наблюдательную программу подсчета галактик (определение зависимости  $N(m)$ ), с помощью которой хотел определить кривизну пространства. Однако этот проект не дал положительного результата.

В 1946 Г. Гамов выдвинул гипотезу «горячей Вселенной» и предсказал существование реликтового излучения. Позднее в 1964 г. это излучение было обнаружено американскими исследователями (А. Пензиасом и Р. Вилсоном).

Для изучения вселенной в больших масштабах необходимо иметь возможность определять расстояния до удаленных объектов. В астрономии не существует универсального способа измерения

расстояний. Описание основных методов оценки расстояний можно найти по адресу (<http://www.astronet.ru/db/msg/1169718>, И.Дроздовский, Методы определения расстояний до галактик) . Большие расстояния в астрономии измеряются по видимым звёздным величинам объектов с известными абсолютными величинами. Такие объекты называются «стандартные свечи». В качестве стандартных свеч используются цефеиды, сверхгиганты, красные гиганты, шаровые скопления, сверхновые типа Ia. Рассматривается возможность измерения расстояния по гамма-всплескам определенных типов.

В последнее десятилетие прошлого столетия в космологических целях проводились исследования сверхновые типа Ia, обладающих большими красными смещениями [23, 24]. Результаты этих исследований оказались впечатляющими. Были уточнены значения постоянной Хаббла  $H_0$  и возраст вселенной  $T_u$  :  $H_0 = 65 \pm 2$  км/сМпс,  $T_u = 14.2 \pm 1.7$  миллиардов лет. Интерпретация зависимости светимость-красное смещение сверхновых с позиции стандартной космологии делала неизбежным вывод, что вселенная в настоящее время расширяется ускоренно. В рамках модели ответственность за ускорение несёт  $\Lambda$  коэффициент уравнения Эйнштейна.

В основе официальных современных космологических моделей лежит *космологический принцип*, согласно которому во Вселенной не должно быть выделенных наблюдателей.

Считается [25], что этот принцип подтверждается астрономическими наблюдениями. Однако эти подтверждения носят косвенный характер. По понятным причинам, мы не обладаем свидетельствами удаленных наблюдателей. Мы обречены изучать вселенную из окрестности Солнечной системы. Нет убедительных доказательств, что все результаты астрономических наблюдений нельзя объяснить, отказавшись от космологического принципа.

Математический аппарат космологии основан на общей теории относительности (ОТО, general relativity – GR), разработанной А. Эйнштейном и Д. Гильбертом в начале прошлого столетия. Объектом исследования ОТО является пространственно-временной континуум, геометрия которого определяется тензором энергии импульса всех форм материи (кроме гравитации). Экспериментальная база, подтверждающая справедливость ОТО, к моменту её создания была весьма скудной. Гравитация в ОТО лишена статуса физического поля – она проявляется в геометрии пространственно-временного континуума. Движения материальных тел, подверженных только грави-

тационному воздействию, определяются геодезическими линиями в этом континууме.

Первые космологические модели строились исходя из предположения стационарности вселенной. В 1917 А.Эйнштейн предлагает модель «цилиндрического стационарного мира», а Де-Ситтер – модель «сферического стационарного мира». В 1922 А. Фридман в немецком физическом журнале публикует статью «О кривизне пространства». В этой работе Фридман показал, что стационарные сферический и цилиндрический миры являются частными решениями уравнения Эйнштейна. Здесь же он приводит нестационарные формы решения этого уравнения. В зависимости от начальных условий нестационарные решения представляют «монотонный» и «периодический» миры. В монотонном мире радиус кривизны со временем увеличивается, тогда как в периодическом мире он совершает колебания. В следующем номере этого же журнала Эйнштейн приводит замечание, в котором подвергает сомнению результаты Фридмана. Однако уже в следующем году он признаёт правильность этих результатов.

В 1927 к тем же выводам, что и Фридман, пришел бельгийский ученый (и заодно католический аббат) Жорж Леметр (1894-1966). Он же интерпретировал наблюдаемое Хабблом красное смещение удаленных галактик, как следствие расширения вселенной.

Расширение вселенной требовало признание существования начала мира. В 1946-48 Г. Гамов предлагает модель «горячей Вселенной» (гипотезу «Большого Взрыва»).

Для построения нестационарных, однородных и изотропных моделей вселенной используется метрика Фридмана-Робертсона-Уокера, интервал событий в которой определяется выражением

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left( dr^2 / (1 - kr^2) + r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2) \right).$$

Здесь  $a$  – масштабный фактор, описывающий расширение вселенной,  $k$  – знак кривизны пространства ( $k = \pm 1, 0$ ).

Для этой метрики из уравнений Эйнштейна следуют [23]:

*Уравнение энергии:*

$$H^2 = (8\pi G\rho + \Lambda c^2) / 3 - k(c/a)^2; H \equiv \dot{a} / a.$$

*Уравнение движения:*

$$\ddot{a} / a = -4\pi G(\rho + 3P/c^2) / 3 + \Lambda c^2 / 3.$$

*Уравнение неразрывности:*

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + 3P/c^2).$$



Из уравнения энергии следует

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1; \quad \Omega_\Lambda = \Lambda c^2 / 3H^2,$$

$$\Omega_k = -k(c/aH)^2, \quad \Omega_m = 8\pi G\rho / 3H^2.$$

В первые мгновения после взрыва согласно горячей модели [23] при  $t < 10^{-11}$  вселенная заполнена релятивистскими частицами с энергией более 300 Гэв. Релятивистские частицы представлены 6-ю типами кварков и антикварков, 6-ю типами лептонов и антилептонов (е,  $\mu$ ,  $\tau$  и  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) и 12-ю калибровочными бозонами (фотон,  $W^\pm$ ,  $Z^0$  и 8 глюонов).

При понижении температуры, когда энергия кинетического движения становится меньше энергии покоя частиц, они начинают аннигилировать. При температуре  $T \sim 200$  МэВ кварк-глюонная плазма превращается в плазму из протонов, нейтронов, пионов, лептонов и антилептонов и фотонов. При температуре  $T \sim 1$  МэВ начинаются реакции синтеза (big bang nucleosynthesis – BBN): образуются ядра дейтерия, трития, гелия и лития. В течение фазы BBN аннигилируют частицы и античастицы, после чего начинается материально-доминантная фаза ( $T \sim 3$  эВ, время  $t \sim 10000$  лет).

Примерно через 300 тыс. лет после начала расширения вещество остывает до температуры  $T \sim 3000$  К. Нейтральный газ становится прозрачным для излучения. Красное смещение поверхности последнего рассеяния  $z \sim 1000$ . При  $10 < z < 1000$  наступает тёмная эра. Образование звёзд, галактик происходит при  $z < 10$ .

## Литература:

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М.: Наука. 1966.
2. Аллер Л. Х. Астрофизика. ИЛ. 1955
3. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: ИЛ. 1960.
4. Аллер Л.Х.. Атомы, звёзды и туманности. М.: Мир. 1976.
5. Макс Планк. Избранные труды. М.: Наука. 1975.
6. Струве О., Зеберге В. Астрономия XX века. М.: Мир. 1968.
7. К. де Ягер. Звёзды наибольшей светимости. М.: Мир. 1984.
8. Ядерная астрофизика. Под редакцией Ч. Барнса, Д. Клейна, Д. Шрамма. М.: Мир. 1986.

9. Шапиро С., Тьюколски С. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звёзды. М.: Мир. 1985.
10. Гурзadyн Г.А. Звездные вспышки. М.: Наука. 1985.
11. Шкловский И. С. Сверхновые звёзды. М.: Наука. 1966.
12. Лозинская Т. А., Сверхновые звёзды и звёздный ветер: Взаимодействие с газом галактики, М.: Наука. 1986.
13. Псковский Ю. П. Новые и сверхновые звёзды. М.: Наука. 1983.
14. Липунов В. М. Астрофизика нейтронных звезд. М.: Наука. 1987.
15. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. 1986
16. Рамнуэль П. Р. Небо в рентгеновских лучах. М.: Наука. 1984.
17. Попов С. Б. и Прохоров М. Е. Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары. (astro-ph/ 0205298).
18. Лучков Б. И., Митрофанов И. Г., Розенталь И. Л. О природе космических гамма-всплесков//УФН. Т.166 . №7. С.743-762.1996.
19. Беляев Н.А, Чурюмов К.И. Комета Галлея и её наблюдение. М.: Наука. 1985.
20. Сурдин В. Г. и Ламзин С. А. Протозвёзды. Где, как и из чего формируются звёзды. Серия ПНТП. М.: Наука. 1992.
21. П. С. Лаплас. Изложение системы мира. Серия «Классики науки». Ленинград. Наука. 1982.
22. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. М.: «Мир». 1979.
23. Turner M. S. and Tyson J. A. COSMOLOGY AT THE MILLENNIUM//arXiv:astro-ph/9901113 1999.
24. Filippenko A.V, and Riess A.G. RESULTS FROM THE HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM/ astro-ph/9807008 v1 1 Jul 1998.
25. Засов А.В. и Постнов К. А. Общая астрофизика. 2006.