



ХИМИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

АСТРОХИМИЯ

ВИБЕ
ДМИТРИЙ ЗИГФРИДОВИЧ
СТОЛЯРОВ
АНДРЕЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

ХИМФАК МГУ

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

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



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ БИОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ЦЫСЬ ДИАНУ ДМИТРИЕВНУ



Оглавление

Лекция 1	9
Понятие астрохимии	9
Особенности астрономических исследований	9
Диапазон электромагнитного излучения	11
Вещество во вселенной	11
Спектроскопия	12
Светимости.....	12
Размеры небесных тел СС	14
Теорема Рассела-Фогта	14
Пределы звездных масс	15
Галактика и место Солнца в ней	16
Радиоастрономия	18
Промежуточный итог	19
Лекция 2	20
Вещество во Вселенной	20
Методы исследования межзвёздной и околозвёздной среды	20
Фотометрия, методы.	22
Древнейшая физическая величина.....	23
Фотометрические системы и показатели цвета	24
Спектральные линии	25
Молекулярные уровни	26
Субмиллиметровый диапазон	26
Сантиметровый диапазон	27
Особенности астрохимических наблюдений	27
Характеристики телескопа	27
Лекция 3	29
Фотометрия: принцип метода, недостатки и преимущества; фотометрические системы и показатели цвета. Возможности фотометрии	29
Основные элементы телескопа. Приёмники излучения (глаз, фотопластинки, фотоэлектронные умножители, приборы с зарядовой связью, инфракрасные детекторы, болометры, радиометры).....	29

Общие требования к телескопу. Источники помех в изображении (атмосферное и световое загрязнение). Выбор места для обсерватории. Внеземные помехи.....	30
Инструменты для наблюдения в разных диапазонах: ультрафиолетовые и оптические телескопы	30
Наземные телескопы и обсерватории	32
Астрохимические исследования в инфракрасном (ИК) диапазоне	34
Подведение итогов по разделу о методах астрохимических исследований.....	34
Лекция 4	35
Обозначения небесных тел	35
Распространенность химических элементов в Солнечной системе	35
Специфика происхождения химических элементов. Нуклеосинтез. Энергия звезд. .	36
Энергия звезд, звездная эволюция. Термоядерные реакции, протон-протонный цикл	38
Лекция 5	40
Термоядерный синтез: CNO- цикл (CNO = углерод-азот-кислород). Эволюция звезд, термоядерные реакции в них.....	40
Вспышки сверхновых звезд, их значение для эволюции Вселенной.....	41
Звезды как основной компонент Вселенной. Строение и виды галактик.....	43
Межзвездная пыль.....	44
Лекция 6	45
Реликтовое излучение. Остаточная температура Вселенной.....	45
Лабораторная атомно-молекулярная спектроскопия: извлекаемая информация	45
Эффект Доплера. Красное смещение	45
Форма и интенсивность спектральных линий. Эффект Зеемана	46
Лекция 7	47
Определение расстояний до космических объектов. Метод тригонометрических параллаксов. Межзвездное поглощение и покраснение света	47
Фотометрический метод определения расстояний до космических объектов. Звездные величины.....	48
Параметры поглощения. Первые исследования свойств космической пыли. Гипотезы образования звезд из пыли. Поляризация звездного света.....	48
Модели пыли.....	50

Разнообразие моделей пыли. Основные выводы о составе частиц межзвездной пыли	51
Лекция 8	52
Космические лучи.....	52
Перенос излучения в меж- и околозвездной средах. Уравнение переноса излучения	53
Решение уравнения переноса: проблемы, методы решения. Диффузионное приближение. Перенос излучения в пыли. Фактор эффективности экстинкции.....	55
Простые случаи переноса излучения в пыли	57
Перенос излучения в молекулярных линиях. Критические плотности переходов. Методы решения уравнения переноса в линиях. Параметры для решения уравнения переноса.....	58
Физические условия в межзвездной среде. Источники нагрева и охлаждения межзвездного вещества.....	59
Лекция 9	62
Распространенность химических элементов (Р.э.) и соединений во Вселенной. Спектры гелия и водорода. Электронное строение атома. Тонкая и сверхтонкая структура водородоподобного атома	62
Молекулярный гамильтониан. Моделирование спектров в астрохимии.....	63
Эволюция космического вещества.	64
Лекция 10	65
Основные виды химических реакций в межзвездной среде. Первые молекулы, образовавшиеся в космосе	65
Красное смещение.	66
Термодинамические условия. Ионная рекомбинация, ион-нейтральное равновесие	66
Лекция 11	68
Условия эффективного охлаждения; основные охладители. Зоны ионизованного водорода	68
Двухфазная модель МЗС. Фазы МЗС. Распределение газов в Галактике.....	69
Местная межзвездная среда. Местный Пузырь и Пояс Гулда	72
Астрохимически важные параметры МЗС.....	74
Лекция 12	75
Спектральные классы объектов Вселенной	75

Молекулы в горячих, остывших звездах, в оболочках старых звезд. Мазерное излучение.....	75
Образование пыли в проэволюционировавших звездах (кислородных, углеродных). Выживание молекул в протопланетарных и планетарных туманностях. Происхождение и разрушение пыли	76
Проблема дисбаланса пыли. Гамма-всплески. Пыль на больших красных смещениях. Субмиллиметровые галактики. Образование пылинок в сверхновых. Трансформация пылинок	77
Лекция 13	79
Круговорот вещества в межзвездной среде. Молекулярные облака, темная материя, кривая вращения галактики.	79
Исследования молекул в молекулярных облаках: актуальность, синтез теории и эксперимента, расчеты, способы наблюдения и извлекаемая информация	81
Межзвездные химические реакции. Уравнения химической кинетики, виды газофазных реакций в МЗС, инициаторы	82
Проблема образования молекулярного водорода в МЗС. Роль пылинок в химических превращениях, протекающих в МЗС, моделирование этих процессов и возникающие при этом проблемы. Вероятностный подход к поверхностным реакциям	85
Лекция 14	87
Астрохимические модели. Астрохимические базы данных.....	87
Неопределенности реакций. Ошибки в определении скоростей реакций. Проблемы с вычислением фотореакций	87
Сложности моделирования реакций с изотопомерами. Отклонения от термодинамического равновесия. Скорость ионизации космическими лучами.....	88
Развитие представлений об образовании звезд. Разработка теории звездообразования. Структура молекулярных облаков. Разработка методов моделирования процессов звездообразования	89
Лекция 15	92
Магнитное поле как фактор, контролирующий динамику молекулярных облаков. "Стандартная" модель звездообразования. Химический возраст ядра, форма спектральных линий.....	92
Массивные дозвездные ядра. Времена жизни протозвездных объектов на разных стадиях. Гравитурбулентная модель.....	92
Сравнение "стандартной" и гравитурбулентной моделей. Базовый сценарий звездообразования	93

Особенности Солнечной системы	94
Лекция 16	97
Фотохимические процессы - основные понятия	97
Круговорот вещества во Вселенной. Локальное термодинамическое равновесие	97
Спектры планетарных туманностей. Динамика возбужденных состояний.....	98
Bowen механизм как пример резонансной флуоресценции. Изотопическое фракционирование.....	100
Лекция 17	101
Особенности термодинамических и квантовохимических методов в астрохимии ..	101
Эффект туннелирования в астрохимии. Методы построения поверхностей потенциальной энергии.....	103
Механизмы инициирования реакций. Катализ на поверхности	103
Лекция 18	105
Формирование Солнечной системы. Планеты Солнечной системы. Классы астероидов. Вода в Солнечной системе. Кометы	105
Гипотезы о формировании Солнечной системы. Протопланетные диски	109
Солнечная туманность минимальной массы. Гравитационная неустойчивость. Внесолнечные планеты. Миграция планет	110
Лекция 19	116
Факторы Франка-Кондона. Вероятности спектральных переходов. Информативность спектров в астрохимии.....	116
Задачи квантовой астрохимии.....	116
Лекция 20	117
Сценарий образования Солнечной системы: место рождения, протосолнечная туманность.....	117
Метеориты как остатки первого вещества во Вселенной. Виды метеоритов, их состав	117
Первичный рост пылинок, возникновение метеоритов, планетезималей и зародышей планет. Проблемы возникновения некоторых планет	120
Модель Большой Оверштаг. Модель из Ниццы. Общие закономерности образования планетных систем	121
Проблема возникновения жизни.....	123
Лекция 21	124

Проблема углового момента в теории планетообразования. Природа аккреции. Физические параметры, несущие информацию о протопланетных дисках	124
Теоретические модели строения протопланетного диска. Молекулярное строение дисков. Проблема перемешивания	125
Проблема светимости. Фуоры, эксоры, природа их вспышек, химические последствия вспышек.....	125
Проблема возникновения жизни. Астробиология. Планеты у других звезд, способы их обнаружения и исследования. Зона обитаемости, землеподобные планеты.....	126
Лекция 22	130
Структура астрохимических исследований. Экспериментальные направления: моделирование фотодесорбции молекул и частиц космической пыли.....	130
Теоретико-экспериментальные направления исследований: моделирование спектров оксидов железа, алюминия, кальция.....	130
Теоретические направления исследований: поиск и анализ спектральных переходов, позволяющих проверить гипотезу об изменении фундаментальных констант за время существования Вселенной	130

Лекция 1.

Понятие астрохимии

Астрохимия – наука, которая призвана объяснить происхождение тех химических соединений, которые мы встречаем во вселенной. Со второй половины XIX века, считалось, что тема астрохимии, как таковая, в науке отсутствует, поскольку сложные молекулярные соединения могут присутствовать только на Земле, а за её пределами не стоит надеяться встретить какие-то химические соединения.

Однако в конце семидесятых годов эта точка зрения изменилась благодаря появлению такого мощного инструмента, как спектральный анализ, который применялся не только к звездам, но он также применялся и в области изучения других тел Солнечной системы, которые обладают протяженными химическими хвостами.

И вот в конце семидесятых годов американский астроном Уильям Хиггинс показал, что некоторые особенности спектров комет как будто бы принадлежат соединениям углерода. Ближе к началу XX века уже это соединение было идентифицировано, как цианоген C_2N_2 и в 1910 году наличие этих молекул в кометных хвостах сразу стало причиной некоторой паники, так как в этот год Земле предстояло пройти через хвост кометы Галлея. И были высказаны опасения, что Земная атмосфера будет отравлена.

На самом деле этого не случилось, так как концентрация кометных хвостов чрезвычайно мала и никаких смертельных концентраций этого газа, и в целом измеряемых концентраций в Земной атмосфере не появилось. Теперь мы знаем, что на самом деле областью действия астрохимии является вся Вселенная.

Молекулы во Вселенной есть практически везде.

Где содержатся молекулы во Вселенной:

- Земля и другие планеты СС
- Кометы и метеориты
- Солнце, звезды, коричневые карлики
- Межзвездная среда (МС)

Особенности астрономических исследований

Проблема исследований в астрохимии заключается в том, что у нас практически всегда нет возможности потрогать исследуемый объект. На данный момент мы исследовали большую часть солнечной системы, и это позволяет нам проводить прямые измерения при помощи лабораторных приборов, но за пределами Солнечной

системы у нас таких возможностей нет. У нас есть возможность сейчас измерять не только электромагнитное излучение, которое приходит к нам из космоса, но и детектировать другие элементарные частицы, которые известны под общим названием космических лучей.

Начиная с 2015 года появился ещё один канал получения информации о космосе — это *гравитационные волны*, но если говорить о межзвездном веществе, то у него молекулярные компоненты, в частности, это исключительно электромагнитное излучение.

Особенность астрохимических исследований состоит в том, что наблюдение космических объектов осложняется наличием помех, которые генерируются другими космическими телами. И основная цель - выделить из этого потока то излучение, которое относится к интересующему нас объекту.

Трёхмерную картинку конечно тоже можно строить, но это уже не результат наблюдений, это результаты последующей обработки и осмысления. У нас очень редко есть возможность наблюдать процессы в развитии и опять же эта возможность практически отсутствует в исследованиях межзвездного вещества. Есть быстрее процессы, некоторые из них наблюдаются действительно в развитии, они разворачиваются у нас на глазах, но эти процессы очень редко как-то связаны с эволюцией молекулярного компонента во вселенной и это в общем-то может приводить к определённым заблуждениям.

Особенности астрономических исследований:

- Удаленность
- Двухмерность
- Длинные временные шкалы
- Зависимость от места на Земле
- Недоступные на Земле физические условия
- Невозможность эксперимента

В астрономии очень распространены внесистемные единицы измерения. В пределах Солнечной системы и других планетных систем очень широко используется Астрономическая единица длины, которая для простоты названа: «астрономическая единица длины».

Единицы измерения:

- Астрономическая единица – 150 млн. км. (среднее расстояние от Земли до Солнца)
- Световой год – 10 трлн. км. (свет проходит за год)
- Парсек – 3.26 светового года, расстояние с которого радиус земной орбиты виден под углом в 1°
- Масса Солнца, M_{\odot} - $2 \cdot 10^{33} \text{ г}$
- Светимость Солнца (мощность), L_{\odot} - $4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$
- Радиус Солнца, R_{\odot} - $7 \cdot 10^{10} \text{ см}$
- Длина волны, длина, размер, Å – ангстрем (10^{-8})

Диапазон электромагнитного излучения

Детекторы способны регистрировать космическое излучение практически во всём разумном диапазоне длин волн от длинноволнового радиоизлучения до гамма-излучения. То, что мы видим невооруженным глазом – оптический диапазон.

Когда говорится о гамма- и рентгеновском излучении, энергию фотонов удобно измерять в электрон-вольтах их производных единицах в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне. Как правило, используется длина волн в радиодиапазоне.

Анализируя распределение энергии по волнам или по частотам, можно очень много всего интересного узнать об объектах, не приближаясь к ним и не имея возможности проводить прямые измерения. Это называется спектром.

Вещество во вселенной

Астрономическая Солнечная система это наша ближайшее окружение:

- Центральная звезда Солнце
- 8 больших планет (планеты земной группы Меркурий Венера Земля и Марс и планеты гиганты Юпитер Сатурн Уран и Нептун)
- Астероиды и кометы

Восемь больших планет это основное распределение вещества в солнечной системе. Заканчивается примерно в 40 астрономических единицах, но тела, которые вращаются вокруг Солнца, могут уходить от него очень далеко. Самые далёкие тела Солнечной системе это так называемое облако Оорта, предположительно состоящее из кометных ядер, которые удалены от Солнца на десятки тысяч астрономических единиц.

Видимый элемент во Вселенной — это звёзды, основные единицы, потому что всё видимое во Вселенной либо является звездами, либо синтезировано в звёздах, либо мы это видим, потому что она освещено или нагрето звездами. О том, что звёзды представляют собой самостоятельные физические тела, люди начали догадываться довольно давно. Ещё Декарт писал об идентичности звезд, видимых ночью и днем. Звездное облако, в котором мы находимся это домашнее плоское образование, которое проецируется на небе в виде полосы «Млечного Пути».

Спектроскопия

19 век показал, что на самом деле и физику звезд мы тоже можем распознать. Первый признак этого был получен в 1802 году. Английский ученый обнаружил, что солнечный спектр — это радуга, которую можно получить, раскладывая солнечный свет при помощи призмы, пересеченной отдельными темными полосами, которые были названы спектральными линиями

Первые два важных факта, которые были с помощью спектрального анализа выведены, заключались в следующем:

- *Солнце и звёзды — это действительно родственные объекты. Звёзды обладают спектрами, которые похожи на Солнечный Спектр в концептуальном смысле, то есть это непрерывный спектр, на фоне которого наблюдаются те или иные линии поглощения*
- *Спектры звезд не идентичны солнечным спектрам. Они разные.*

Сейчас используется спектральная классификация звезд, которая тоже обозначена буквами латинского алфавита и идут эти спектральные классы вот в таком порядке:

- *O, B, A, F, G, K, M (Oh, Be, A, Fine, Girl, Kiss, Me)*

Разные спектры — это просто температура поверхности звезды, то есть на самом деле мы говорим не о том, что есть или нет других линий, мы говорим о температуре. Спектр (яркость) соответствует интенсивности, и мы видим, что по мере продвижения по главной последовательности пик интенсивности смещается от синего диапазона до красного, то есть это просто температура.

Светимости

Температура звёзд варьируется от 3000 до 50000. Предел светимости тоже дозируется в очень широких пределах. Если нарисовать диаграмму температуры звезды относительно её светимости, то на этой диаграмме они сформируют две группы, последовательности (см рис. 1.1.).

- *Главная последовательность (90% всех звёзд)*
- *Последовательность гигантов*

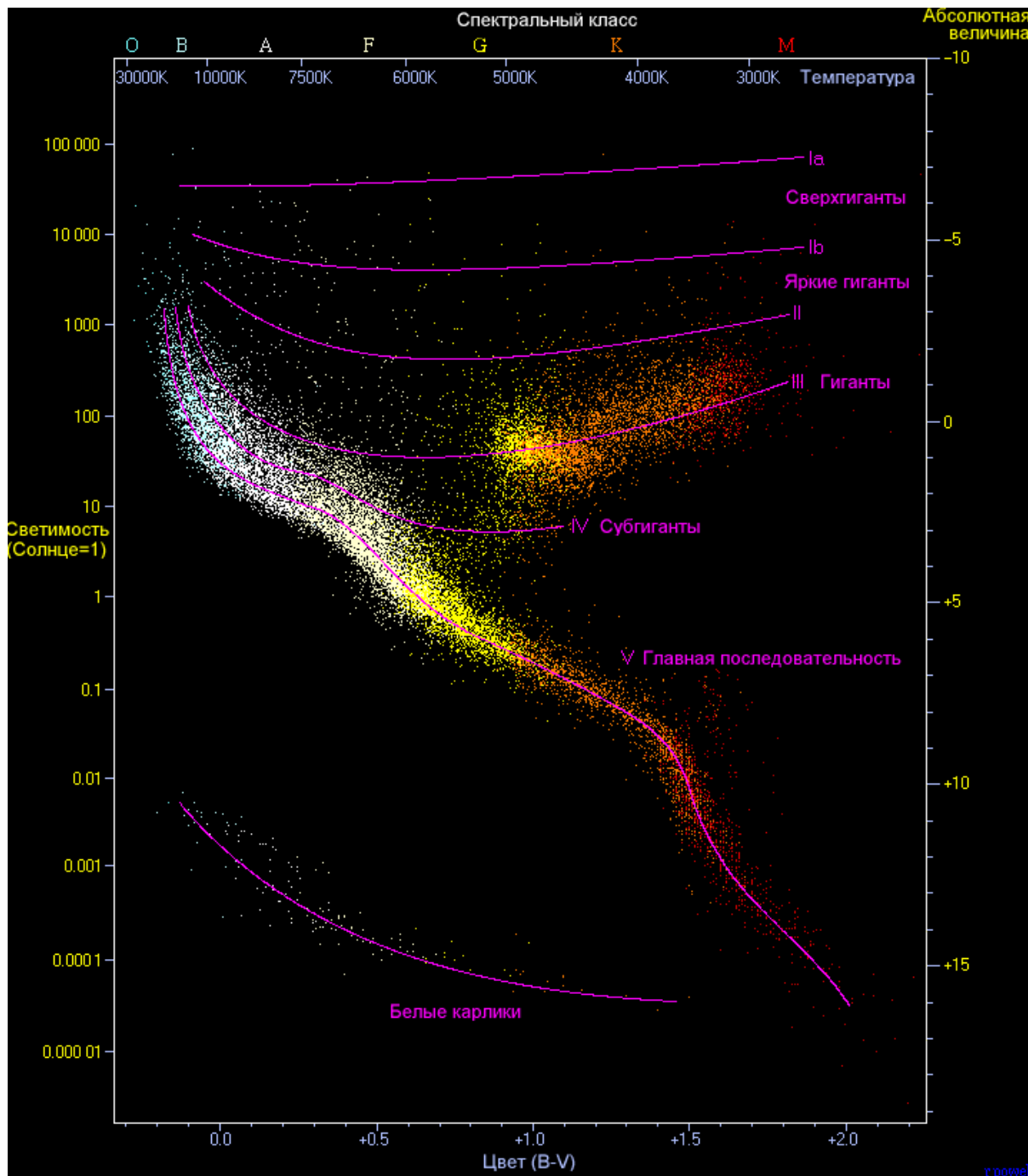


Рисунок 1.1. Диаграмма светимостей звёзд (Герцшпрунга-Рассела)

То есть нужны звёзды горячие и яркие для того чтобы построить эту диаграмму. Появление этой диаграммы навело астрономов на мысль, что она может отражать ход звёздной эволюции. Первоначально возникали гипотезы, что звёзды образуются красными гигантами, затем попадают на главную последовательность, а затем движутся вниз — предполагалось, что всё это время они излучают энергию за

счёт сжатия. Однако, эта модель быстро показала свою несостоятельность: в таком случае возраст Солнца должен был составлять не более 100 миллионов лет, что входило в противоречие с данными биологов и геологов. Только в 1930 году противоречие разрешилось само собой: было выяснено, что источником энергии звёзд являются термоядерные реакции.

Размеры небесных тел СС

Группа по возрастанию размеров объектов СС: Меркурий → Марс → Венера → Земля → Уран → Нептун → Сатурн → Юпитер.

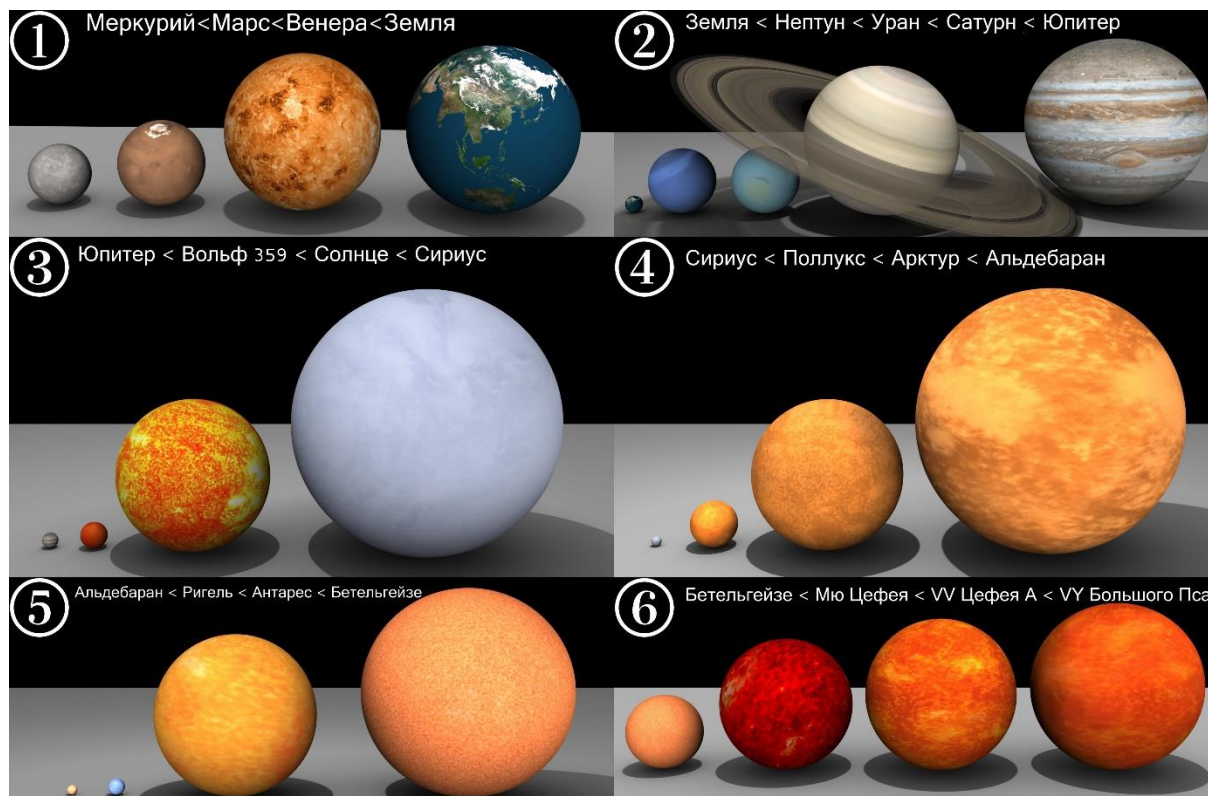


Рисунок 1.2. Соотношение размеров небесных тел

Теорема Рассела-Фогта

Теорема:

- *Эволюция одиночной звезды полностью определяется ее начальной массой и начальным химическим составом*

Ключевой параметр звезды — это её масса, а точнее — начальная масса, потому что в процессе эволюции она может меняться, как правило, в сторону убывания.

Если сказать о Звезде, что она имеет «такую» массу, то значит, что вы про эту звезду сказали практически всё.

Это настолько важное утверждение, что оно известно в астрономии как Теорема Рассела-Фогта.

Пределы звездных масс

Имеются:

- Нижний предел или предел Кумара (0,08 масс Солнца или 80 Юпитеров)
- Верхний предел. По большому счёту мы не знаем есть ли он. В нашей Галактике не встречаются звёзды с массой больше 150 масс солнца

Но это может быть статистическим условием. Есть подозрение, что в соседней Галактике существуют и более массивные звезды. Есть некие соображения, которые говорят о том, что звезда не может иметь беспрельдно большую массу.

Формула, которая называется начальной функцией масс:

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-2.35}$$

Начальная функция масс предлагает нам учесть тот факт, что масса звезды в процессе эволюции может меняться, и поэтому интересно говорить о том, как звёзды распределены по массам при рождении.

Во что это выливается: согласно функции, на одну звезду очень большой массы приходится несколько сотен звёзд меньших масс.

Солнце не является типичной звездой!

Типичная звезда – это красный карлик радиус порядка 1^{10} от солнечного, а температура порядка 3000 К, светимость 10^{-31094} от солнечной. Вот это типичные звёзды в нашей Вселенной. Неудивительно, что ближайшая к нам звезда – это красный карлик. Для разнообразия назвали «Ближайшая», но, чтобы было красиво, назвали по-гречески «Проксима».

В астрономии названия делятся на две группы:

- Вычурные и красочные названия
- Название, которое придумал «Капитан Очевидность». Астрономическая единица длины называется «Астрономическая единица длины» и так далее

Галактика и место Солнца в ней

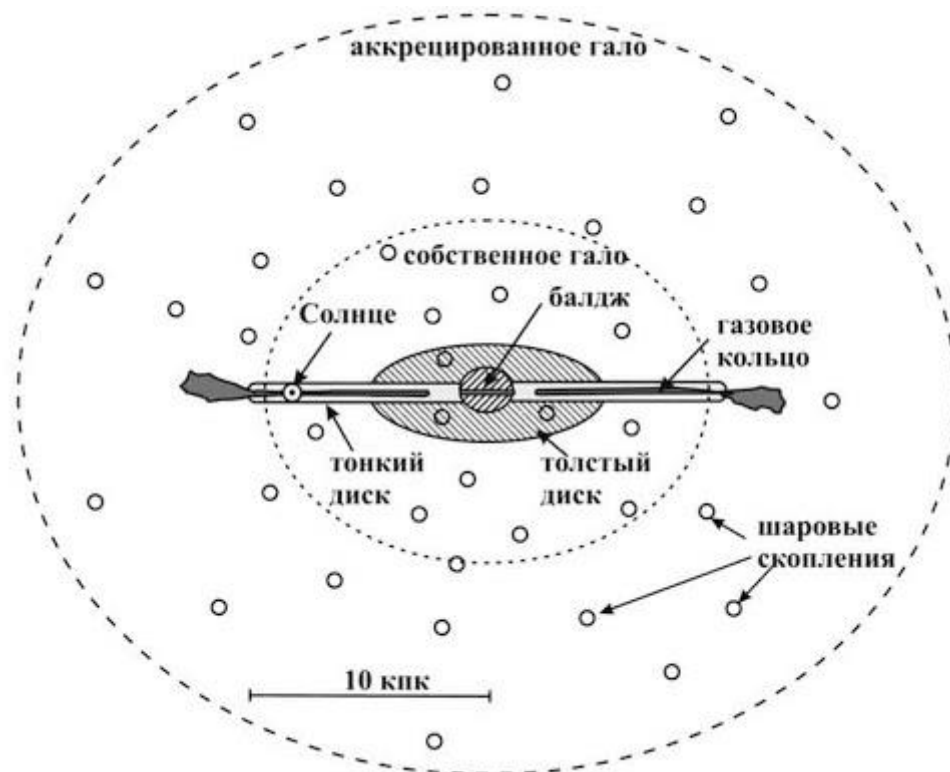


Рисунок 1.3. Строение галактики Млечный Путь

- Тонкий диск – толщина порядка 100 – 700 пк (парсек), масса примерно 10^{11} масс Солнца, радиус не менее 20 кпк (килопарсек)
- Толстый диск – шкала высот порядка 1 – 1.5 кпк, примерно 10^{10} масс Солнца
- Балдж – несколько кпк, примерно 10^{10} масс Солнца
- Гало – сферическая подсистема, десятки кпк, примерно 10^9 масс Солнца
- Солнце – звезда диска, 8 кпк от центра Галактики, 10 пк над плоскостью диска

Наша галактика относится к классу «спиральных галактик», то есть значительная часть звёзд и межзвёздного вещества закручена в вот такие вот спиральные рукава или спиральные ветви (см. рис. 1.4.):

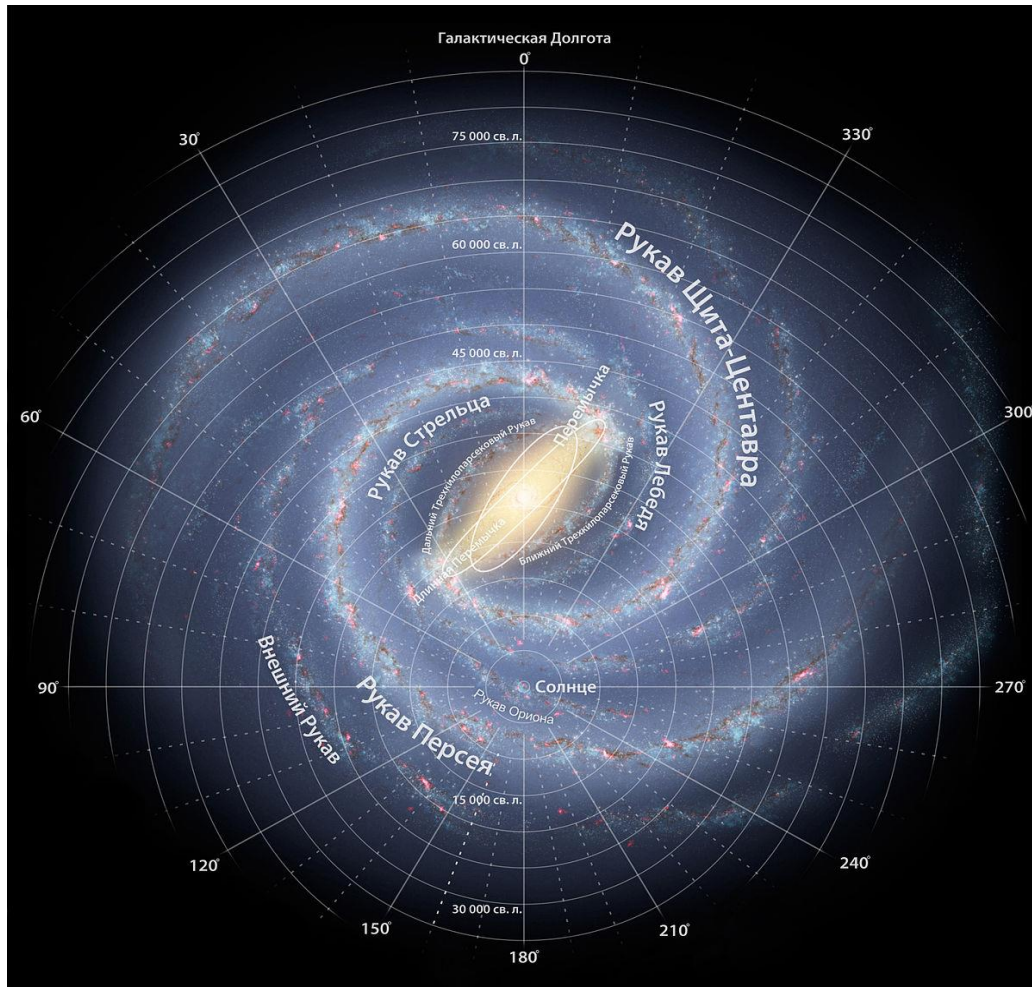


Рисунок 1.4. Схематическое изображение галактики Млечный Путь

Мы знаем, что спиральные рукава есть, но мы не знаем, даже точно, сколько их. Считается, что их либо два, либо четыре, но скорее всё-таки основных и крупных два.

Вещество, которое заполняет пространство между звездами.

Звёзды — это наиболее заметный элемент Вселенной, потому что они видны глазом. Если мы начинаем смотреть другие диапазоны, то мы начинаем видеть *межзвёздное вещество*. Это вещество мешает нам в должной мере наслаждаться видом тонкого диска нашей галактики.

О том, что звездное пространство не пусто люди начали догадываться довольно давно и это было связано с тем что появилось в распоряжении астрономов возможность производить телескопические наблюдения, а когда мы смотрим на небо глазом, мы видим в основном только звёзды и даже когда мы видим не звёзды, нам сложно догадаться, что мы видим не звёзды. А когда люди начали смотреть на небо в телескоп, они обнаружили, что среди звезд попадаются не точки, а более размытые объекты,

которые похожи на облака или на туман. И для этих объектов было придумано слово «туманность».

Спектры, по крайней мере, некоторых туманностей очень сильно отличаются от спектров звёзд. Если мы видим непрерывный спектр, то мы видим линии поглощения в спектрах большого количества туманностей, которые называются *эмиссионными*. Но мы практически невидим непрерывного спектра, но видим довольно большое количество эмиссионных линий, но если вспомнить откуда берутся эмиссионные линии, то становится понятно, что туманности это разряженный горячий газ. То есть это объект, который физически от звёзд отличается очень сильно, поскольку тогда спектральный анализ был ещё не очень развит.

Есть хорошо наблюдаемые линии поглощения. Стало ясно, что наличие спектральной линии означает, что данное вещество в исследуемом объекте есть, но отсутствие спектральной линии не означает, что этого вещества нет. Все потому что спектральной линии требуются особые условия для своего появления. А наблюдаем в основном потому, что она очень хорошо попадает в видимый диапазон, на который ориентируются практически все телескопы.

Радиоастрономия

После того, как в распоряжении астрономов появились радиотелескопы, первое радионаблюдение было проведено в 1932 году. Инженер, решающий техническую задачу, никак не связанную с астрономией, выяснил причину помех, которые мешают трансатлантической радиосвязи. Он обнаружил такую интересную вещь, что некий источник помех появляется и исчезает. Появление и исчезновение этого источника происходят с периодом 23 часа и 56 минут, а это звездное время вращения Земли вокруг оси вращения, но не относительно Солнца, а относительно других звезд.

Солнечные сутки равны 24 часам - это промежуток времени между двумя последовательными прохождением Солнца через небесный меридиан (в полдень). Солнечные сутки примерно на 4 мин длиннее звездных из-за того, что Земля одновременно вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца. Поэтому на солнечные сутки приходится 24 часа, а на звездные в тех же единицах приходится 23 часа 56 минут. Это означало, что источник помех находится не просто не на Земле, он находится не в солнечной системе. Сейчас знают, что он наблюдал радиоизлучения, которые приходят из центра Галактики.

Астрономы были настолько не готовы к этому открытию, что на протяжении двух десятков лет никто из астрономов на это открытие внимания не обращал. Обратили внимание только после Второй Мировой Войны.

Солнце тоже является источником радиоизлучения.

Промежуточный итог

- *Основной компонент видимой Вселенной – звёзды:*
 - *Температуры от 3000 до 50000 K*
 - *Радиусы от $0.1 R_{\odot}$ до $2000 R_{\odot}$*
 - *Массы от $0.08 M_{\odot}$ до $150 M_{\odot}$*
- *Звёзды собраны в галактики*
 - *Млечный Путь: масса $10^{12} M_{\odot}$, радиус 100 кпк*
- *Пространство между звёздами заполнено газом и пылью*
- *Наиболее плотные конденсации межзвездного газа называются молекулярными облаками*

Лекция 2

Вещество во Вселенной

Основным компонентом Вселенной являются *звёзды*. Звезды скапливаются в масштабные группы, «Звездные скопления», которые называются галактиками. Помимо звезд во Вселенной существует *неизвестное вещество*. Это вещество состоит из газа и пыли, причём газ — это в основном смесь водорода и гелия. Пространство между звездами заполнено также пылью. Так же, есть места, где скапливаются наиболее плотные элементы межзвездного вещества, такие пространства называются *молекулярными облаками*. Весь основной цикл химических процессов во Вселенной происходит именно в молекулярных облаках межзвездного вещества.

Методы исследования межзвёздной и околозвёздной среды

- Реальный объект
 - Процессы в объекте
 - Процессы на луче зрения
 - Помехи
- Наблюдения
 - Процессы в телескопе
 - Редукция
- Реальная физическая картина
 - Спектры
 - Спектральные карты
 - Звёздные величины
- Физическая модель
 - Модель физических процессов
 - Модель процессов на луче зрения
- Численная модель
 - Программная реализация
 - Расчёт
 - Модель телескопа
- Синтетическая физическая картина
 - Спектры
 - Спектральные карты
 - Звёздные величины

Излучение — не единственный источник информации

- Нейтринная астрофизика
- Астрофизика гравитационных волн
- Космические лучи

- Прямые исследования

Исследование межзвездной среды — это специфическая наука, она отличается от прочих наук тем, что в основном отсутствует возможность какого-то прямого воздействия на исследуемый объект, отсутствует возможность проведения запланированного эксперимента, и поэтому понятие эксперимента в основном практически отсутствует.

То есть то, что в физике и химии получается из эксперимента, в астрономии получается просто из разглядывания неба, это и есть основная процедура получения астрономических знаний. Все процессы, происходящие на этом объекте мы фиксируем на уровне генерируемого излучения, а это излучение распространяется по межзвездной среде от этого объекта.

Излучение попадает на *телескоп*.

После получения этого наблюдения, информацию нужно обработать, чтобы перевести в понятные физические величины интенсивности, освещенности. И по итогам всего мы имеем изображение реальной физической картины этого объекта.

Несколько лет назад появился новый источник информации о Вселенной — это *гравитационные волны*.

У нас есть возможность всё-таки проводить исследования хотя бы и при помощи автоматических аппаратов. Сейчас побывали спускаемые аппараты на Луне, на Венере, на Марсе, на спутнике Сатурна Титане.

Главным источником информации остаётся все-таки *электромагнитное излучение* и наиболее полная форма получения информации об излучении — это *получение спектра* звезды. Звёзды довольно горячие, эффективная температура около 7900 градусов, в Кельвинах мы видим непрерывный спектр абсолютно черного тела, и он пронизан многочисленными спектральными линиями.

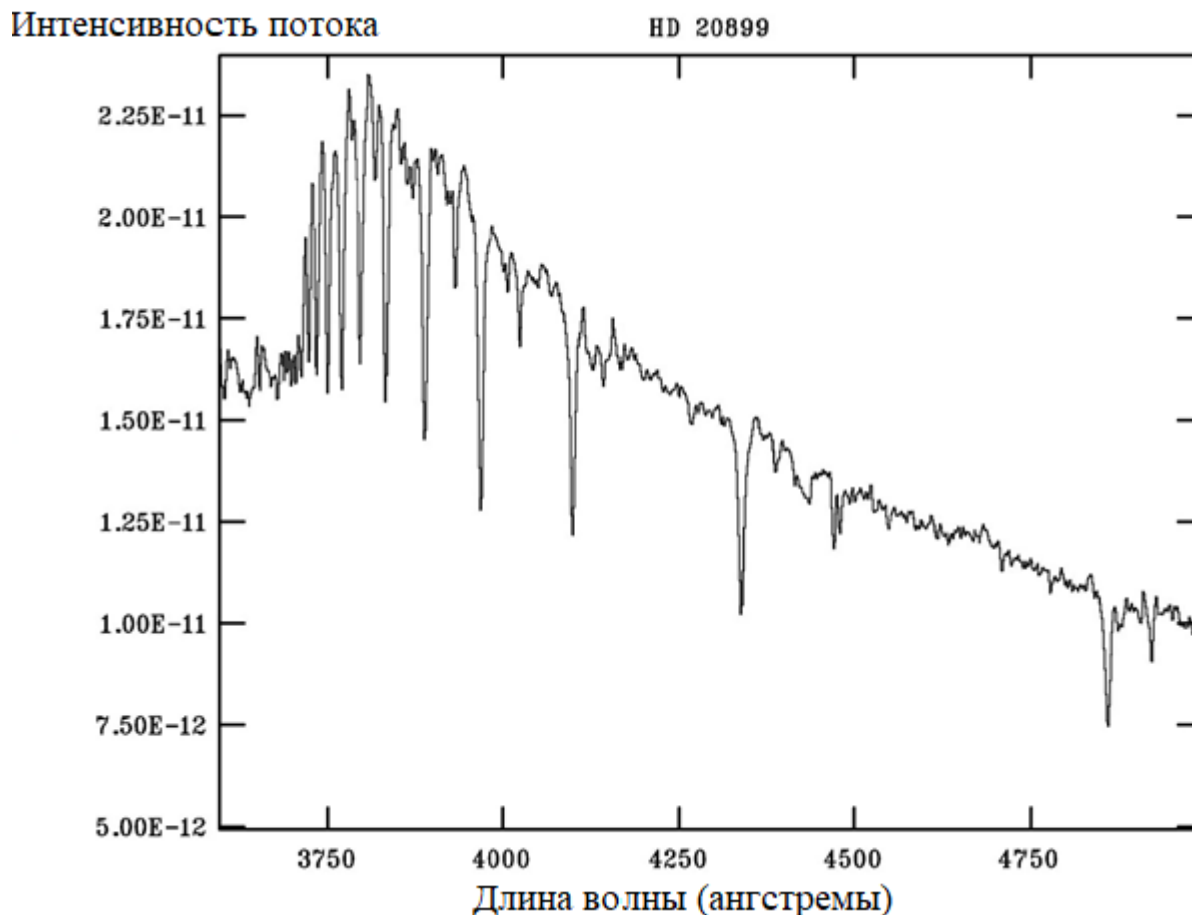


Рисунок 2.1. Пример спектра звезды HD 20899. $\lambda_{\max} = 3800 \text{ \AA} = 380 \text{ нм} = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ см}$

Фотометрия, методы.

Раздел *наблюдательной астрономии*. Область астрономии, занимающаяся измерением потоков и интенсивностей электромагнитного излучения небесных светил, а также разработкой методов и техник для этого. В случае, когда измеряется не только количество излучения, но и проводится его распределение по длинам волн, используется термин спектроскопия. Основная задача: определение цвета исследуемого объекта.

Методы, используемые для выполнения фотометрии зависят от длины волны и режима в стадии изучения. В самом простом варианте фотометрия проводится путём сбора излучения в телескоп. Кроме того, возможно пропустить полученное электромагнитное излучение через специализированные оптические фильтры, с последующим захватом и записью световой энергии при помощи светочувствительных инструментов. Набор полос (фильтры) входят в понятие системы замера.

Исторически, фотометрию в ближней инфракрасной и длинноволновой ультрафиолетовой части спектра осуществляли при помощи фотометра — фотоэлектрического прибора, разработанного для измерения интенсивности света от

одного и того же объекта, направляя его луч на фоточувствительный элемент. Эти фотометры впоследствии в большинстве своём были заменены на приборы, созданные на базе ПЗС-камер, которые могут одновременно фиксировать изображения нескольких объектов. Тем не менее, фотоэлектрические фотометры по-прежнему используются в некоторых случаях, например, когда не требуется высокого разрешения.

Применение:

- Другие физические свойства объекта, такие как температура или химический состав, могут быть определены с помощью спектроскопии. Как правило, спектроскопические измерения нескольких объектов получают с помощью двух фильтров и построением диаграммы «цвет—величина».
- Фотометрия также используется для исследования вариации света объектов, например, переменных звёзд, малых планет, активных ядер галактик и сверхновых, или обнаружения планет, расположенных вне Солнечной системы. Измерения этих отклонений могут быть использованы, например, для определения периода обращения и радиусов членов затменной двойной звёздной системы, периодов обращения малых планет или звёзд, или совокупной вспышки энергии сверхновой звезды.

Древнейшая физическая величина

$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg \left(\frac{E_1}{E_2} \right) - \text{Формула звездной величины}$$

- *Звёздная величина — обратная!*
- *Видимая величина характеризует только поток излучения от объекта, но не его энергетику*
- *Звёздная величина задаётся при помощи стандартов*
- *Звезда нулевой величины (0^m) создаёт освещённость $2.54 \cdot 10^{-6}$ люкс.*

Абсолютная звёздная величина — физическая величина, характеризующая светимость астрономического объекта. Для разных типов объектов используются разные определения абсолютной величины, но, как правило, они все связаны с видимой звёздной величиной.

Известные звездные величины

- ✓ *Солнце: -26.7^m*
- ✓ *Полная Луна: -12.7^m*
- ✓ *Венера: -4.7^m*

✓ Сириус: -1.47^m

✓ Вега: 0.03^m

- Звёздная величина $\rightarrow \frac{E_1}{E_2} = 2.512^{m_2 - m_1} \left(2.512 = \sqrt[5]{100}\right)$
- Абсолютная звёздная величина $\rightarrow M = m + 5 - 5 \lg r$
- Боллометрическая величина $\rightarrow M_{\text{bol}} = 4.75 - 2.5 \lg \frac{L}{L_{\text{sol}}}$

Основные величины были введены во втором веке до нашей эры древнегреческим астрономом, которому мы обязаны первым звёздным каталогом. Звездный каталог это не просто положение звезд на небе, это их физическая характеристика: яркость их изучения. Он разделил звезды на 6 классов, самым ярким звездам был присвоен первый класс, первая звездная величина.

В середине XIX века появилась возможность измерения не только яркости, но также цвета. Важная характеристика Звездной величины, которую следует всегда помнить - цвет. Она ни в коем случае не характеризует яркость объекта!

Яркость не несет в себе информации об энергетике объекта, пока не будет известно расстояние до данного объекта.

Астрофотография. Ее основатель:

Карл Шварцшильд — показатель цвета
 $CI = m_{\text{pg}} - m_{\text{vis}} \text{ (1900)}$

Фотометрические системы и показатели цвета

- ✓ Звёздные величины B и V
- ✓ Показатель цвета $B - V$ (Разница между двумя величинами $B - V$ характеризует свет звезды. Чем больше показатель Света, тем звезда краснее)
- Что нужно измерить: распределение энергии в спектре с низким спектральным разрешением $R = \lambda / \Delta\lambda$ (фотометрия)
- Что можно определить: температуру (среднюю по больнице) и лучевую концентрацию (поверхностную плотность) вещества (column density)

Не требует большого количества света. Когда идет исследование, используется свет, который приходит от звезды. Разница между двумя величинами $B - V$ характеризует светимость звезды.

Спектральные линии

- Что нужно измерить: распределение энергии в спектре с максимально высоким спектральным разрешением $R = 1 / \Delta\lambda$ (**спектроскопия**) — существенно более высокие требования и к объекту, и к оборудованию

Далее измеряют:

- Температура объекта и плотность вещества
- Турбулентные и регулярные движения (эффект Доплера)
- Лучевая концентрация конкретного компонента (иона, атома, молекулы)
- Магнитное поле (эффект Зеемана и пр.)

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} = \frac{u}{c}$$

Формула 2.2. Лучевая концентрация

- Уширение давлением — *профиль Лоренца*
- Доплеровское уширение (*тепловое и нетепловое*) — *гауссиана*

$$\Delta \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}}$$

Формула 2.3. Доплеровское уширение

Спектральные полосы определяют:

- Молекулы
- Твёрдое вещество
- Молекулы в твёрдом веществе

Наблюдая за расщеплением спектральных линий, вы получаете информацию о магнитном поле объекта. Это связано с тем, что есть электронные состояния молекул, а есть ещё состояние вращательное.

Поэтому вместо одной спектральной линии вы получаете сливание в полосу. Эти полосы озадачили наблюдателей в конце тридцатых годов двадцатого века, когда они помимо тонких спектральных линий в спектрах начали обнаруживать широкие полосы.

Молекулярные уровни

- Электронные переходы — видимый, УФ-диапазон
- Колебательные переходы — ближний ИК-диапазон
- Вращательные переходы — дальний ИК, радиодиапазон

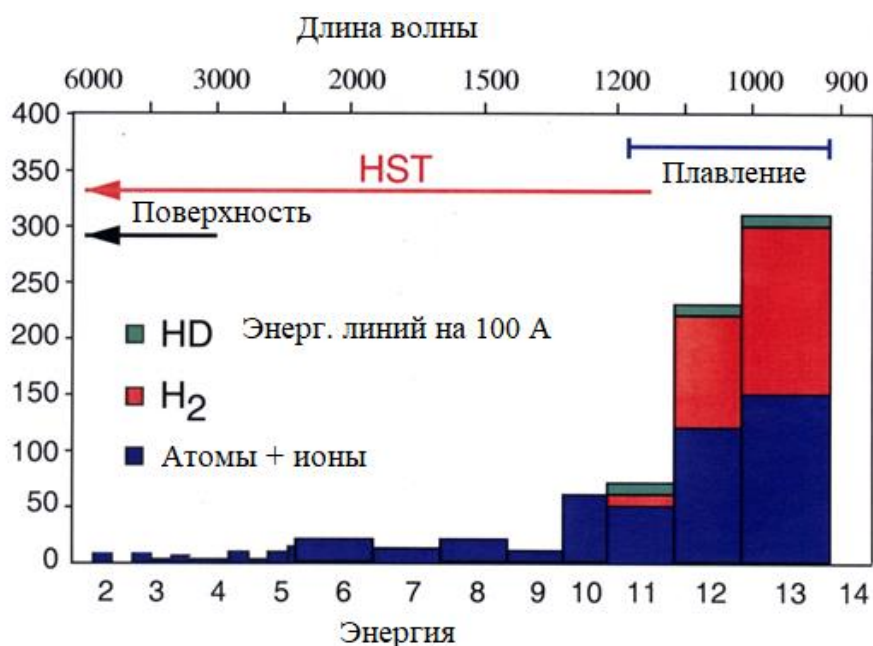


Рисунок 2.4. Распределение линий молекул по диапазонам: ультрафиолет

Наблюдения в инфракрасном диапазоне проводятся часто, но возникают проблемы. Такое излучение хорошо поглощается в земной атмосфере, потому что источники инфракрасного излучения в линиях обладают колебательными переходами, которые легко возбуждаются в тёплой плотной среде. Атмосфера — это тоже тёплая плотная среда, и тут есть все те же молекулы, которые нас интересуют в космосе.

Субмиллиметровый диапазон

Что нужно для наблюдения астрохимически важных компонентов?

- **Поглощение (абсорбция)** — те же требования, что и для любых спектральных наблюдений. Особенно важен ультрафиолетовый диапазон (и для молекул, и для пыли). **Нужен хороший источник непрерывного спектра.**

- **Излучение (эмиссия)** — наблюдения в ИК-, субмиллиметровом и т. д. диапазонах, нужны большие собирающие поверхности
- **Возможность построения карт**

Субмиллиметровые длины волн в диапазоне примерно от 100 до 1000 микрон и до одного миллиметра. Диапазон с поверхности Земли практически не наблюдаем. Необходимо поднимать телескопы на высоту несколько километров, что не сказывается положительно на оборудовании.

При этом диапазоне изучают очень многие молекулы, которые нам по разным причинам интересны. Это кислород, вода, тяжёлая вода.

Сантиметровый диапазон

Самый простой в реализации это диапазон *сантиметровый*.

Беспрепятственно проникает через атмосферу Земли. Именно с сантиметрового диапазона исследования радиоизлучения начались молекулы, которые были обнаружены в привычном радиодиапазоне.

Информацию о молекулярном составе межзвёздного вещества мы можем получать практически в любом диапазоне от жесткого ультрафиолета до сантиметрового диапазона. Это наблюдение — единственный способ наблюдать молекулы в этом диапазоне, но здесь ограничение связано с тем, что обязательно нужен фоновый источник излучения. Если фонового источника излучения нет, то увидеть что-либо будет сложно.

Особенности астрохимических наблюдений

- **Ограниченность времени наблюдений** (погода, длительность ночи, восходы-заходы, близость к Солнцу)
- **Помехи земной атмосферы**
- **Наличие «паразитных» источников излучения** (как внутри, так и вне аппаратуры)

Космические телескопы необходимо охлаждать. Если не охлаждать инфракрасный телескоп, то он будет наблюдать собственное тепловое излучение. *Жидкий гелий служит основным охладителем.*

Характеристики телескопа

- **Собирающая поверхность (больше света)**
- **Угловое разрешение (seeing)**
- **Спектры (карты)**

- Фотометрия (карты)
- Угловое разрешение (не так важно):

$$\sin \vartheta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

$$\vartheta'' = \frac{0.14}{D(\text{м})} \text{ для видимого света}$$

$$\vartheta'' = \frac{206}{D(\text{м})} \text{ для длины волны 1 мм}$$

Основные характеристики телескопа — это площадь собирающей поверхности и угловое разрешение. Понятно, что чем больше объектив телескопа, тем больше он собирает света, а, следовательно, растет качество изображения.

Угловое разрешение — это минимальный угол между двумя точечными источниками. Разрешение в видимом диапазоне для наземных телескопов не зависит от диаметра объектива, а зависит от того где телескоп поставлен. На месте с хорошей, стабильной атмосферой будет хорошее разрешение.

Лекция 3

Фотометрия: принцип метода, недостатки и преимущества; фотометрические системы и показатели цвета. Возможности фотометрии

- Что нужно измерить: распределение энергии в спектре с низким спектральным разрешением $R = \lambda / \Delta\lambda$ (**фотометрия**)
- Что можно определить: температуру (среднюю по больнице) и лучевую концентрацию (поверхностную плотность) вещества (column density)

Фактически единственным источником информации для нас является электромагнитное излучение. В широком диапазоне спектра, от гамма-лучей до длинноволнового радиоизлучения.

Спектральные исследования

Спектр — это существенно более богатый источник информации. Но спектральные исследования определяют соответственно более высокие требования к аппаратуре и или исследуемому объекту.

Либо необходимо использовать очень хороший телескоп, либо следует долго проводить наблюдение одного объекта, либо стоит ограничиться только яркими объектами.

Основные элементы телескопа. Приёмники излучения (глаз, фотопластинки, фотоэлектронные умножители, приборы с зарядовой связью, инфракрасные детекторы, болометры, радиометры)

Приёмники излучения

- Квантовая эффективность (отношение числа регистрируемых фотонов к общему числу фотонов, попавших на детектор)
- Линейность (пропорциональность отклика детектируемому сигналу)
- Динамический диапазон (различие между самым сильным и самым слабым сигналом, которые могут регистрироваться данным приёмником)
- Спектральный диапазон
- Шумовые характеристики
- Быстродействие
- Размер разрешающих элементов и их количество

Приёмники излучения

- Химические

- Фотоэлектрические
- Телевизионные
- ПЗС и другие полупроводниковые детекторы
- Болометры
- Гетеродинные приёмники
- Счётчики фотонов

Общие требования к телескопу. Источники помех в изображении (атмосферное и световое загрязнение). Выбор места для обсерватории. Внеземные помехи
Телескоп: общие требования

- ✓ Большая собирающая поверхность — время накопления, угловое разрешение
- ✓ Спектральное разрешение (фильтры, диспергирующий элемент, гетеродин)
- ✓ Приёмник излучения
- ✓ Место расположения (лучшее — Космос)

Для проведения качественных астрономических наблюдений нужен большой телескоп.

Необходимо выбрать хорошее месторасположение. Лучшее место для телескопа — это то место, где он избавлен от атмосферных помех.

Но и на Земле к выбору места для установки телескопа следует подходить очень вдумчиво, необходимо так же учитывать степень загрязнённости атмосферы. Обычно выбирают места для установки достаточно удаленные от крупных городов и других мест большого скопления людей. Чаще всего это большие открытые пространства: степи или плато.

Атмосфера в разных местах планеты также поглощает по-разному, все это нужно учитывать.

Инструменты для наблюдения в разных диапазонах: ультрафиолетовые и оптические телескопы

Таблица 3.1. Инструменты наблюдения в различных диапазонах

Инструмент	Диапазон	Разрешение
Aerobee-150	1000–1500 Å	500

Copernicus	900–3150 Å	20000
IUE	1150–3350 Å	13000–18000
HUT	825–1850 Å	600
IMAPS	950–1150 Å	80000
BEFS	900–1200 Å	3000
GHRS	1150–3400 Å	80000
STIS	1150–3100 Å	30000–110000
FUSE	905–1187 Å	20000
COS	1150–3200 Å	20000–24000

Оптический диапазон

- Эмиссионные линии атомов и ионов
- Линии межзвёздного поглощения (гораздо меньше, чем в УФ)
- Диффузные межзвёздные полосы поглощения
- Поглощение и рассеяние пылью

Идет работа в основном с приемниками излучения. Оптический диапазон считается основным диапазоном для исследования звезд, но тем не менее и в межзвездной среде в оптическом диапазоне очень многое можно наблюдать. Это и эмиссионные линии в туманностях, и линии межзвездного поглощения.

Флагман инструментов в этом диапазоне является, конечно, космический *телескоп имени Хаббла*:



Рисунок 3.1. Космический телескоп имени Хаббла

Все благодаря своему внеатмосферному положению. Это позволяет получать на нём изображение практически дифракционного качества в оптическом диапазоне, и к тому же проводить наблюдение в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.

Наземные телескопы и обсерватории

Таблица 3.2. Основные наземные телескопы

Название	Диаметр	Тип зеркала	Страна/организация	Расположение	Ввод в строй
Large Binocular Telescope (LBT)	(2×8.4 м)	Двойное зеркало	США, Италия, Германия	Маунт-Грэхем, США	2007

Gran Telescopio Canarias (GTC)	10.4 м	Сегментированное, 36	Испания (90%), Mexico, США	Канарские острова	2006/9
Keck	10 м	Сегментированное, 36	США	Мауна-Кеа, Гавайи	1993
SALT (11 м × 9.8 м)	9.2 м	Сегментированное, 91	ЮАР, США, Великобритания, Германия, Польша, Новая Зеландия	SAAO	2005
НЕТ (11 м × 9.8 м)	9.2 м	Сегментированное, 91	США, Германия	Мак-Дональд, США	1997
Subaru	8.3 м	Сплошное	Япония	Мауна-Кеа, Гавайи	1999
VLT	8.2 м	Сплошное	ESO + Чили	Параналь, Чили	1998
Gemini North	8.1 м	Сплошное	США, Великобритания, Канада, Чили, Австралия, Аргентина, Бразилия	Мауна-Кеа, Гавайи	1999
Gemini South	8.1 м	Сплошное		Серро-Пачон, Чили	
MMT	6.5 м	Сплошное	США	Обсерватория им. Уиппла, США	2000
Magellan 1 и 2	6.5 м	Ячеистое	США	Лас Кампанас, Чили	2000
БТА-6	6 м	Сплошное	СССР (Россия)	Зеленчукская, Россия	1976

Наземным телескопам характерен большой размер конструкции и зеркал.

На данный момент основной упор идет на увеличение размеров телескопов. Необходимо сделать эти телескопы достаточно большими, для достижения новых пределов качества изображений, но также достаточно легкими, чтобы данные телескопы можно было отправить на земную орбиту.

Астрохимические исследования в инфракрасном (ИК) диапазоне

При проведении астрохимических исследований возникают трудности. Они связаны с тем, что земная атмосфера в инфракрасном диапазоне теряет прозрачность. И если в оптическом диапазоне хорошая погода, то излучение мы почти беспрепятственно воспринимаем в инфракрасном диапазоне. Чем дальше мы уходим, тем хуже становится прозрачность атмосферы.

Наряду с участками без помех присутствуют в спектре также участки, в которых атмосфера непрозрачна, это поглощение водяного пара и зона поглощения углекислого газа. И чем дальше мы продвигаемся в инфракрасную область, тем меньше у нас становятся окон прозрачности, и тем больше становится тех диапазонов, в которых пропускания нет.

И поэтому возникла идея: инфракрасный телескоп вывести за пределы земной атмосферы, чтобы уже никаких этих проблем с помехами не было, но здесь мы сталкиваемся со второй очень крупной проблемой.

Инфракрасные телескопы необходимо охлаждать.

Подведение итогов по разделу о методах астрохимических исследований

Что нужно запомнить из этого раздела:

- Фотометрия: звёздные величины, фильтры, В, V
- Спектроскопия: линии поглощения и линии излучения
- Для фотометрии и спектроскопии межзвёздного вещества требуются наблюдения в УФ и длинноволновых диапазонах
- Наблюдения в длинноволновых диапазонах требуют больших зеркал и удачного расположения обсерватории
- Наблюдения в УФ-диапазоне требуют наличия фонового источника и космической обсерватории
- Итогом работы телескопа является измерение интенсивности (потока) в конкретном направлении или карта (фотометрическая или спектральная)

Лекция 4

Обозначения небесных тел

- ✓ Собственные имена: Вега, Лист Клевера, Трубка, Тухлое Яйцо, Сатурн
- ✓ Звёзды: α Sco, 61 Cyg, BY Dra, V838 Mon, HD 189733, HR 8799... (но BL Lac, γ Per)
- ✓ Тёмные глобулы: B68, CB17, L1544...
- ✓ ИК-источники: IRAS, IRC+10216
- ✓ Радиоисточники: W49
- ✓ Прочие: Sgr A*, Sgr B2(N), Cyg X, Cyg X-1
- ✓ Сборные: M, NGC, IC

Распространенность химических элементов в Солнечной системе

Таблица 4.1. Химические элементы Земли

Элемент	Процент массы
Железо	32
Кислород	30
Кремний	15
Магний	14
Сера	2.9
Никель	1.8
Кальций	1.5
Алюминий	1.4
Хром	0.4
Фосфор	0.2

Натрий	0.1
Кобальт	0.1

Таблица 4.2. Химический состав Солнца

Элемент	Процент массы
Водород	73.7 (71.5)
Гелий	25.1 (27.0)
Кислород	0.56
Углерод	0.24
Неон	0.13
Железо	0.08
Азот	0.07
Кремний	0.07
Магний	0.07
Сера	0.05

Специфика происхождения химических элементов. Нуклеосинтез. Энергия звезд.

Нуклеосинтез – это природный процесс образования ядер химических элементов тяжелее водорода. Нуклеосинтез является причиной наблюдаемой распространенности химических элементов и их изотопов.

Три главные стадии нуклеосинтеза включают в себя:

- Первичный нуклеосинтез (проходивший на начальных стадиях существования Вселенной в процессе Большого Взрыва), см. рис. 4.1.
- Звёздный нуклеосинтез (при спокойном горении и при взрывах звёзд)
- Нуклеосинтез под действием космических лучей.

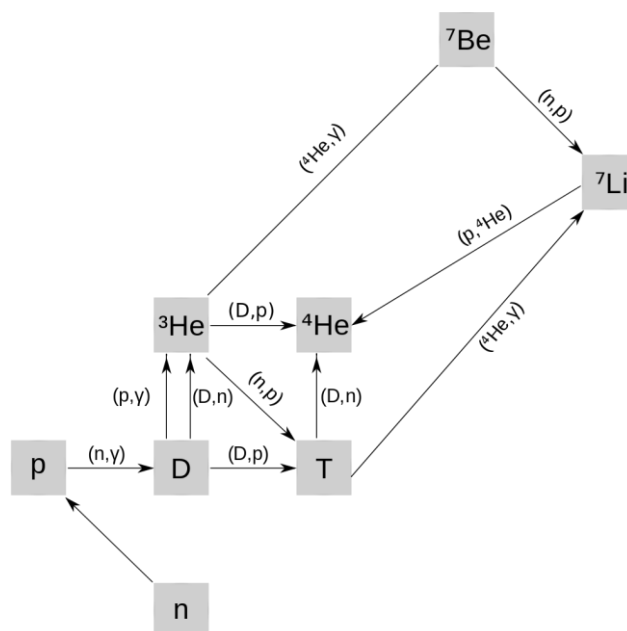


Рисунок 4.1. Схема первичного нуклеосинтеза химических элементов путем ядерных превращений

В процессе первичного нуклеосинтеза образуются элементы не тяжелее лития, стандартная модель Большого Взрыва предсказывает следующее соотношение элементов: $1\text{H} — 75\%$, $4\text{He} — 25\%$, $\text{D} (2\text{H}) — 3 \cdot 10^{-5}$, $^3\text{He} — 2 \cdot 10^{-5}$, $^7\text{Li} — 10^{-9}$, что хорошо согласуется с экспериментальными данными определения состава вещества в объектах с большим красным смещением (по линиям в спектрах квазаров).

Кратковременность процесса первичного нуклеосинтеза (несколько минут) и нестабильность ядер с массовыми числами 5 и 8 («щели» в спектре масс ядер) не позволяют образоваться более тяжёлым ядрам, которые возникают лишь впоследствии, в звёздном нуклеосинтезе и под действием космических лучей в реакциях скалывания.

Часть самых лёгких ядер, кроме первичного нуклеосинтеза, образуются в звёздах. Основным источником энергии звёзд главной последовательности является синтез гелия-4 из водорода в протон-протонном цикле и (для звёзд, более тяжёлых, чем Солнце) в CNO-цикле. В протон-протонном (pp) цикле, как промежуточные продукты, образуются дейтерий, гелий-3 и литий-7.

Гелий-4 образуется также при горении первичного дейтерия, которое может происходить даже в коричневых карликах, где ещё невозможен pp-процесс из-за слишком малых температуры и давления в центре.

Синтез более тяжёлых ядер также происходит в звёздах. Углерод-12 нарабатывается в тройной гелиевой реакции (включая её взрывообразное проявление, известное как гелиевая вспышка, в ядрах красных гигантов):

Нуклеосинтез был возможен только в очень плотном состоянии вселенной. Вселенная расширяется, плотность понижается, и, соответственно, скорости реакций тоже понижаются, эффективность захвата нейтронов понижается.

Энергия звезд, звездная эволюция. Термоядерные реакции, протон-протонный цикл

Источник энергии Солнца и звёзд

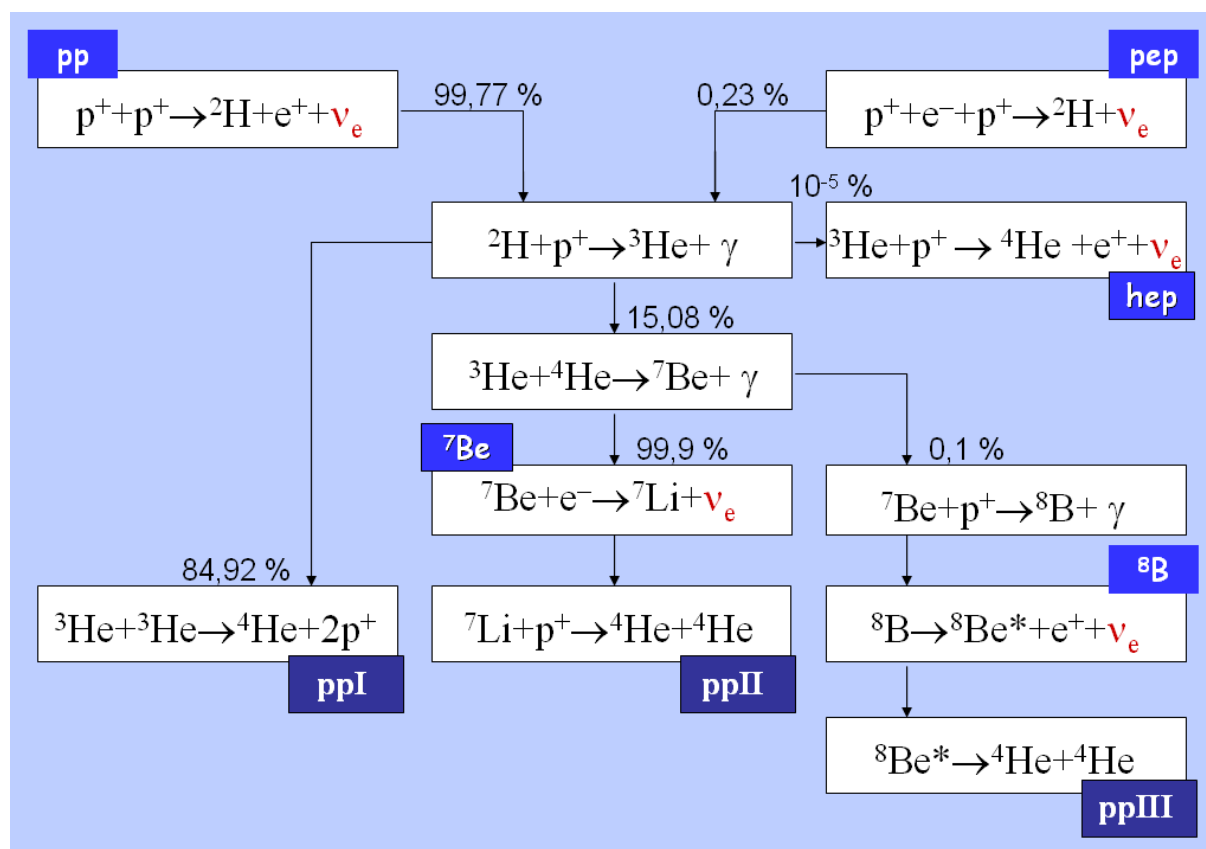


Рисунок 4.2. Протон-протонный цикл

Протон-протонный цикл — совокупность термоядерных реакций, в ходе которых водород превращается в гелий в звёздах, находящихся на главной звёздной последовательности; основная альтернатива CNO-циклу. Протон-протонный цикл

доминирует в звёздах с массой порядка массы Солнца или меньше, на него приходится до 98 % выделяемой энергии.

Цикл принято делить на три основных цепочки: **ppI**, **ppII**, **ppIII**. Существенный вклад в энерговыделение вносят только первые две. Оставшиеся превращения существенны только при точном подсчёте количества высокоэнергичных нейтрино.

Конечным продуктом цепочки **ppI**, доминирующей при температурах от 10 до 14 миллионов градусов, является ядро атома гелия, возникшее в результате слияния четырёх протонов с выделением энергии, эквивалентной 0,7 % массы этих протонов. Цикл включает в себя три стадии. Вначале два протона, имеющие достаточно энергии, чтобы преодолеть кулоновский барьер, сливаются, образуя дейтрон, позитрон и электронное нейтрино; затем дейтрон сливается с протоном, образуя ядро ^3He ; наконец, два ядра атома гелия-3 сливаются, образуя ядро атома гелия-4. При этом высвобождаются два протона.

Другие две цепочки (**ppII** и **ppIII**) вносят вклад в цикл при более высоких температурах, чем **ppI**. На Солнце около 85 % слияний водорода в гелий-4 происходят через **ppI**.

Время, через которое Солнце израсходует своё «топливо», и термоядерная реакция прекратится, оценивается в 6 миллиардов лет.

Лекция 5

Термоядерный синтез: CNO- цикл (CNO = углерод-азот-кислород). Эволюция звезд, термоядерные реакции в них

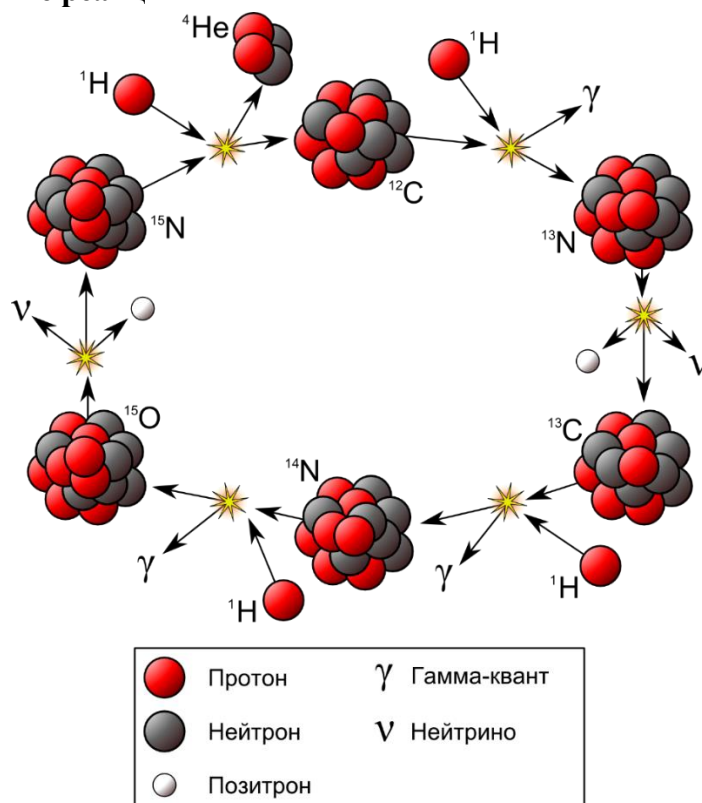


Рисунок 5.1. Термоядерный синтез: CNO-цикл

CNO-цикл — термоядерная реакция превращения водорода в гелий, в которой углерод, кислород и азот выступают как катализаторы. Считается одним из основных процессов термоядерного синтеза в массивных звёздах главной последовательности.

Это совокупность трёх сцепленных друг с другом или, точнее, частично перекрывающихся циклов. Самый простой из них — **CN-цикл** (цикл Бете, или углеродный цикл) — был предложен в 1938 году Хансом Бете и независимо от него Карлом Вайцзеккером.

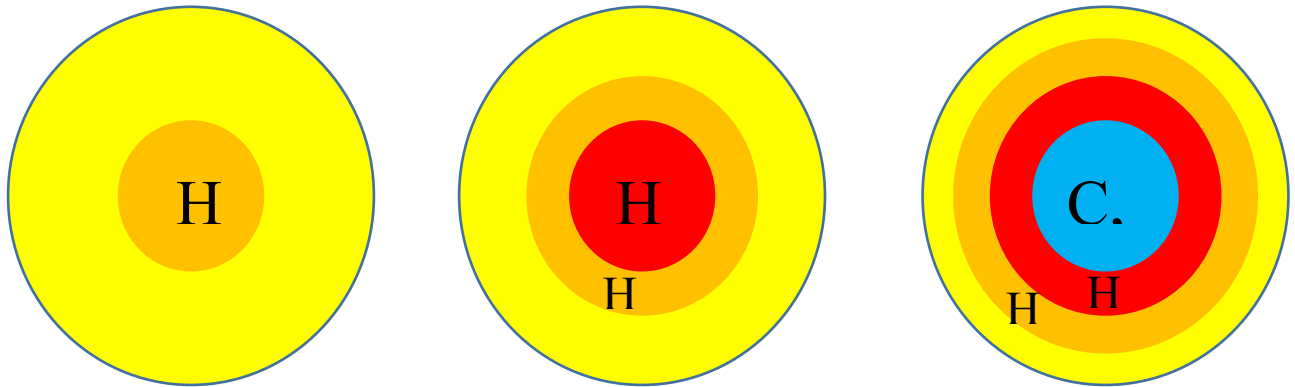
Время жизни на главной последовательности:

Определяется формулой –

$$\tau_H = \frac{E_H}{L} \propto \frac{M}{L} \propto M^{1-\eta} \propto M^{-2.5}$$

Дальнейшие термоядерные реакции, происходящие во время нуклеосинтеза:

- Тройной альфа-процесс; $^{12}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O}$



Горение гелия:

- ❖ $\alpha + \alpha + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$
- ❖ $\alpha + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$
- ❖ $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{18}\text{F} + e^+ \rightarrow ^{18}\text{O} + \alpha \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \alpha \rightarrow ^{25}\text{Mg} + n$
- ❖ $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + n$

Появляются свободные нейтроны

Далее горение углерода

- ❖ $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg}^* \rightarrow ^{23}\text{Mg} + n$
 - $^{20}\text{Ne} + \alpha \rightarrow$ реакции с появлением свободных нейтронов
 - $^{23}\text{Na} + p$

Итог: кислород, неон, магний

Вспышки сверхновых звезд, их значение для эволюции Вселенной

Итог для звезд 13 и 75 масс Солнца:

Масса	13 масс Солнца	75 масс Солнца
Горение водорода в ядре	13 млн лет	3 млн лет
Горение гелия в ядре	2.7 млн лет	0.5 млн лет
Горение углерода в ядре	2.8 тыс лет	1 тыс лет
Горение кислорода в ядре	4.8 года	0.9 года
Горение неона в ядре	0.3 года	0.57 года
Горение кремния в ядре	18 дней	2 дня

Вспышка сверхновой с коллапсом ядра

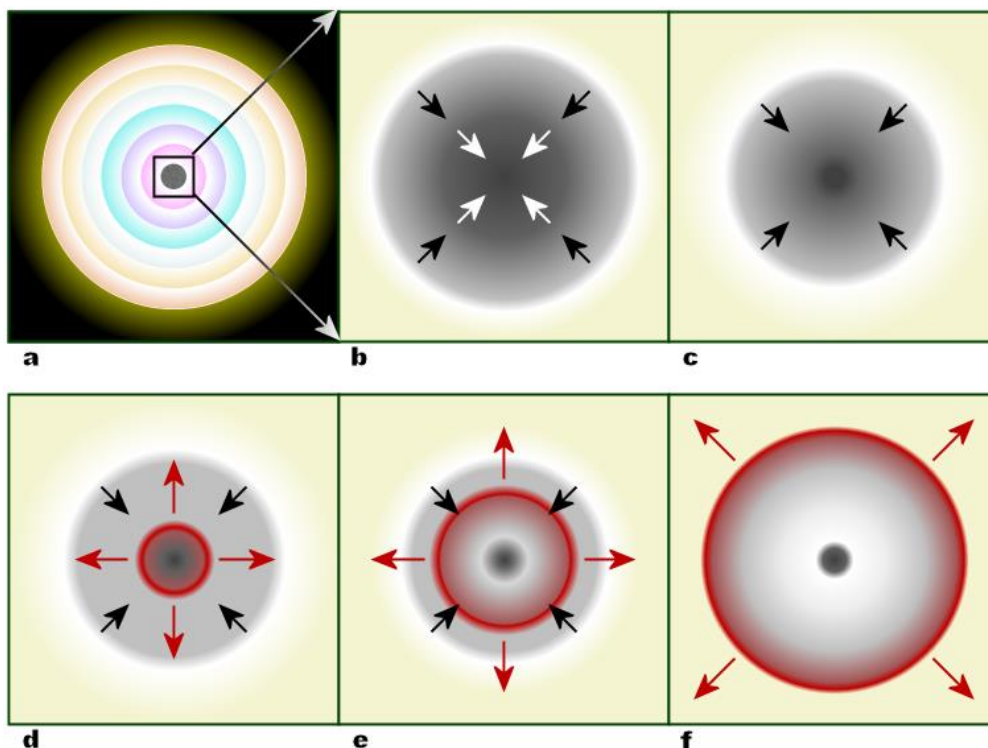


Рисунок 5.2. Схема коллапса ядра

Во время вспышки (коллапса, см. рис. 5.2.) сверхновой происходит:

- Выброс тяжёлых химических элементов, синтезированных как за время эволюции звезды, так и при взрыве (r-процесс)
- Источник механической, тепловой и лучистой энергии (турбулизация, нагрев и ионизация межзвёздной среды), а также космических лучей
- Благодаря вспышкам сверхновых влияние одной массивной звезды охватывает значительный объём галактики (маломассивные звёзды берут количеством)

Звезды как основной компонент Вселенной. Строение и виды галактик

Основной компонент видимой Вселенной — звёзды

- Светимость — от 10^{-4} до 10^6 светимостей Солнца
- Температура — от 2000 К до 50000 К
- Радиус — от 0,1 до тысяч радиусов Солнца
- Масса — от 0,08 до 150(?) масс Солнца
- Время жизни — от нескольких миллионов до триллионов лет

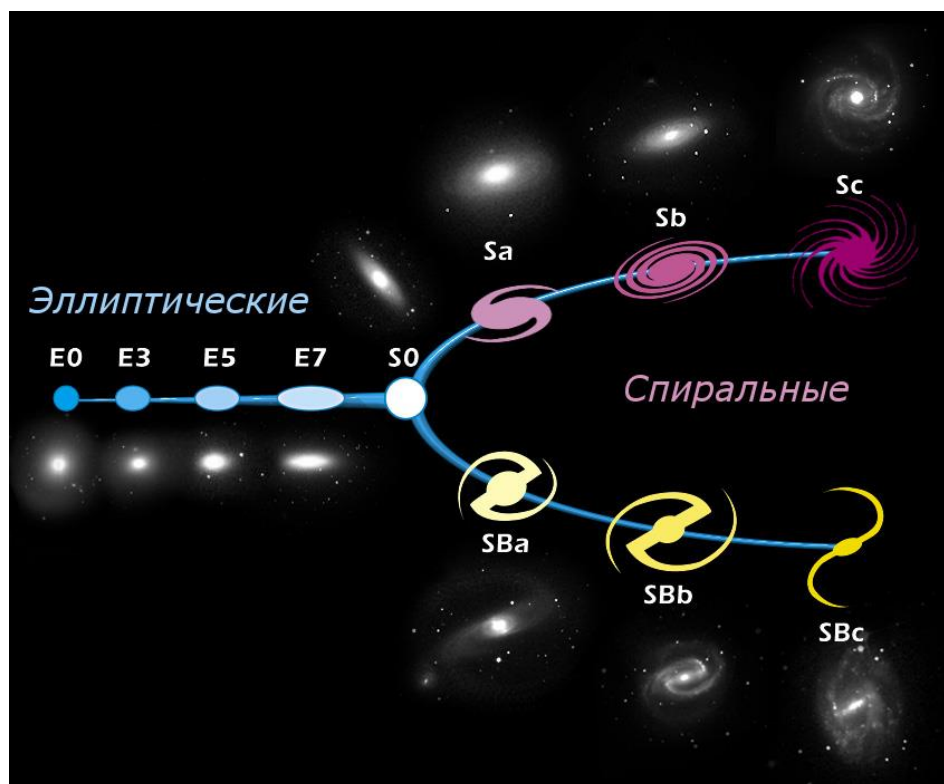


Рисунок 5.3. Виды галактик

Говоря о межзвездной среде, мы говорим главным образом о водороде.

Межзвездная пыль

Немаловажный ингредиент МЗС, это пыль.

Помимо газа в межзвездной среде присутствует также пыль, в основном мы её видим в результате того, что она поглощает фоновое излучение. Пыль содержит твёрдые микроскопические частицы, наряду с межзвёздным газом, заполняющие пространство между звёзд.

В настоящее время считается, что пылинки имеют тугоплавкое ядро, окружённое органическим веществом или ледяной оболочкой. Химический состав ядра определяется тем, в атмосфере каких звёзд они сконденсировались. Например, в случае углеродных звёзд, они будут состоять из графита и карбида кремния.

Типичный размер частиц межзвёздной пыли от 0,01 до 0,2 мкм, полная масса пыли составляет порядка 1 % от полной массы газа. Свет звёзд нагревает межзвёздную пыль до нескольких десятков Кельвинов, благодаря чему межзвёздная пыль является источником длинноволнового инфракрасного излучения.

Пыль также влияет на химические процессы, проходящие в межзвёздной среде: пылевые гранулы содержат тяжёлые элементы, которые используются как катализатор в различных химических процессах. Гранулы пыли участвуют и в образовании молекул водорода, что увеличивает темп звездообразования в металло-бедных облаках

Лекция 6

Реликтовое излучение. Остаточная температура Вселенной

Спектр абсолютно черного тела. Интенсивность этого излучения изучают с помощью закона Планка. Он связывает интенсивность излучения температуры тела с длиной волны. Но самое главное это зависимость длины волны. Формула подразумевает равновесие разницы температур.

Мы можем наблюдать излучение в разных областях. Основные проблемы заключаются в том, что эксперимент провести над космическими объектами невозможно. Однако, в лабораторных условиях вполне реально строить математические модели изучаемых объектов, а также пытаться воссоздать астрохимические условия в пределах Земной атмосферы.

Лабораторная атомно-молекулярная спектроскопия: извлекаемая информация

- *Положение спектральных линий*
- *Структура энергетических уровней*
- *Сила линий и вероятности переходов*
- *Форма и ширина спектральных линий*
- *Расщепление и сдвиг линий под действием электромагнитного поля*

Основная задача: аналитическая.

Эффект Доплера. Красное смещение

Эффект Доплера — изменение частоты и, соответственно, длины волны излучения, воспринимаемой наблюдателем (приёмником), вследствие движения источника излучения и/или движения наблюдателя (приёмника). Эффект назван в честь австрийского физика Кристиана Доплера.

Причина эффекта Доплера заключается в том, что, когда источник волн движется в направлении наблюдателя, каждый последующий гребень волны выходит из положения, более близкого к наблюдателю, чем гребень предыдущей волны. Таким образом, каждой последующей волне необходимо немного меньше времени, чтобы добраться до наблюдателя, чем предыдущей волне. Следовательно, время между приходом последовательных гребней волн на наблюдателя сокращается, вызывая увеличение частоты:

$$\omega = \omega_0 \frac{\left(1 + \frac{u}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

Форма и интенсивность спектральных линий. Эффект Зеемана

Эффект Зеемана — расщепление линий атомных спектров в магнитном поле. Назван в честь Питера Зеемана, открывшего эффект в 1896 году.

Эффект обусловлен тем, что в присутствии магнитного поля электрон, обладающий магнитным моментом, приобретает дополнительную энергию. Приобретённая энергия приводит к снятию вырождения атомных состояний по магнитному квантовому числу и расщеплению атомных спектральных линий.

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = -m_e \omega_0^2 \vec{r} - e\vec{v} \times \vec{B},$$

Лекция 7

Определение расстояний до космических объектов. Метод тригонометрических параллаксов. Межзвездное поглощение и покраснение света

Прямое определение расстояний — параллакс

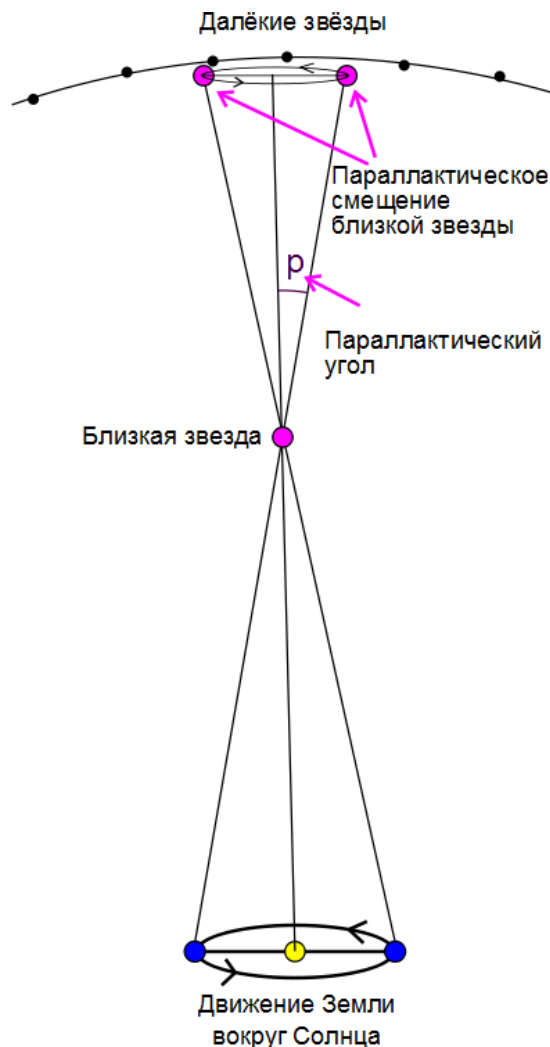


Рисунок 7.1. Метод параллакса

Изменение видимого положения объекта относительно удалённого фона в зависимости от положения наблюдателя.

Зная расстояние между точками наблюдения L (базис) и угол смещения α , можно определить расстояние D до объекта:

$$D = \frac{L}{2 \sin \alpha/2}$$

Фотометрический метод определения расстояний до космических объектов.

Звездные величины

Звёздные величины

- Звёздная величина $\frac{E_1}{E_2} = 2.512^{m_2 - m_1} \left(2.512 = \sqrt[5]{100} \right)$
- Абсолютная звёздная величина $M = m + 5 - 5 \lg r$
- Болометрическая величина $M_{\text{bol}} = 4.75 - 2.5 \lg \frac{L}{L_{\text{sol}}}$

Фотометрические расстояния

- Выводятся из сравнения видимой и истинной яркости
- Требуют наличия «стандартных свечей». Модуль расстояния: $m - M = 5 \lg r - 5$

В астрономии для определения яркости звезд существует понятие звездной величины. Для того, чтобы характеризовать реальную энергетику объектов, вводится другая звёздная величина, которая называется *абсолютной* звездной величиной.

Абсолютная звездная величина — это звездная величина звезды, которую она имела бы, если бы мы наблюдали её с расстояния в 10 пк.

Определение абсолютной звездной величины записывается в виде вот такой вот простой формулы:

$$m - M = 5 \lg r - 5$$

, где расстояние r измеряется в процентах.

Параметры поглощения. Первые исследования свойств космической пыли. Гипотезы образования звезд из пыли. Поляризация звездного света

Параметры поглощения

- $m(l) = M(l) + 5 \lg d - 5 + A(l)$
- $A(l_1) - A(l_2) = E(l_1 - l_2)$

Проходя через МЗС, излучение краснеет

Пыль — основная причина поглощения

Первые модели пылинок

- Грязный лёд (вода, аммиак, метан, углекислый газ)

- Металл
- Конденсация
в межзвёздной среде или в звёздах

Звёзды — из пыли?

- Механизм образования звёзд — радиационная имплозия глобул Бока (Bok & Reilly 1947) Большое количество пылевых частиц под действием собственной массы и гравитации подвергаются колоссальному сжатию, которые и вызывает резкий энергетический скачок (имплозия или взрыв), под действием которого и формируются звездные ядра.

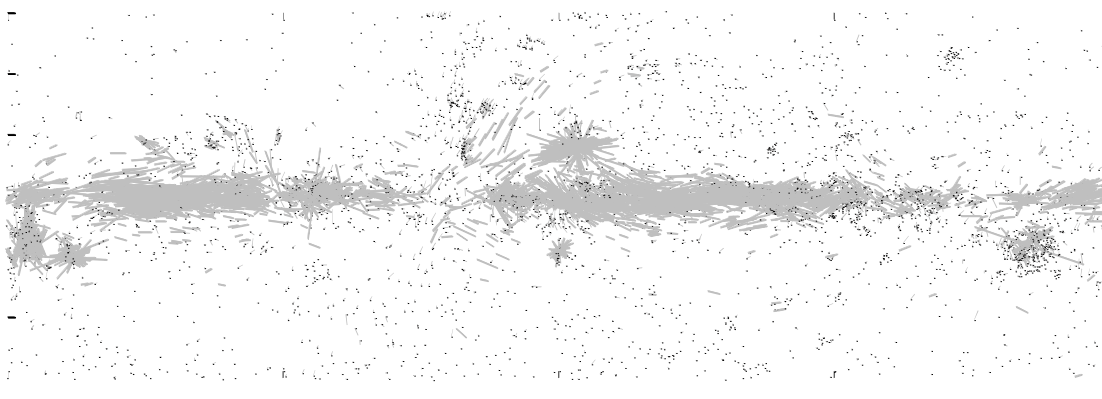


Рисунок 7.2. Поляризация звёздного света

Наблюдаемый свет частично поляризован в направлении проекции магнитного поля на картинную плоскость.

Вещество может либо поглощать излучение, то есть приводить к полному исчезновению фотона, либо рассеивать, то есть направлять его в другую сторону от наблюдателя. Предполагалось, что рассеяние подчиняется закону Релея и интерпретация была изначально не очень корректной.

Еще одно проявление взаимодействие излучения с межзвездным веществом, а именно поляризация звёздного света. Излучение всех звезд поляризовано слабо, но тем не менее поляризация присутствует практически повсеместно. Объясняется явление межзвездной поляризации света тем, что космические пылинки обладают несимметричной формой. Еще они каким-то образом ориентированы в пространстве, это объясняется космическими взаимодействиями пылинок с магнитным полем, соответственно пылинки должны обладать магнитными свойствами. Они выстроены

вдоль силовых линий или поперёк силовых линий, как железные опилки, если к ним поднести магнит.

Модели пыли

Модели пыли

- Ослабление (экстинкция)
- Эмиссия
- Поляризация
- Содержание элементов

Вычисление оптических свойств

- Показатели преломления (химический состав)
- Структура (слои, пористость)
- Форма
- Метод (теория Ми, DDA и т. п.)
- Результат: Q_{sca} , Q_{abs} , $\langle \cos\theta \rangle$

$$g = \langle \cos \theta \rangle = \int_{-1}^1 p(\cos \theta) \cos \theta d \cos \theta$$

Независимо от того, насколько сильно поглощено излучения звезды много, мы всегда можем определить её спектральный класс.

Модель MRN (1977):

Графит + Силикаты (оливин, энстатит и пр.)

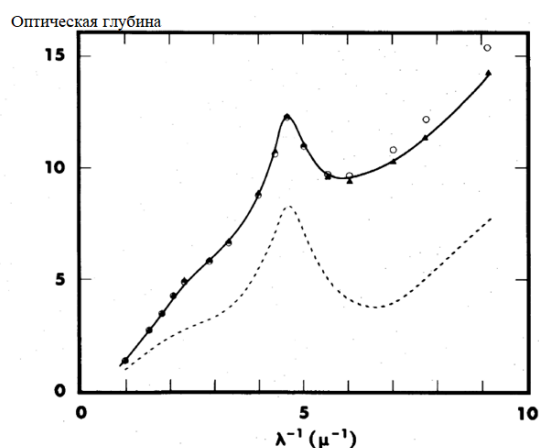


Рисунок 5.3. Модель MRN

Согласно этой модели, Космическая пыль состоит из смеси графитовых и силикатных частиц.

Разнообразие моделей пыли. Основные выводы о составе частиц межзвездной пыли

- ✓ Полициклические ароматические углеводороды
- ✓ Графит
- ✓ Аморфный углерод
- ✓ Силикаты ($MgFeSiO_4$)
- ✓ Композитные частицы: силикаты + органика ($C_{25}H_{25}O_5N$), водяной лёд и поры

По составам:

- ПАУ + графит + силикат
- ПАУ + графит + силикат + композитные частицы
- ПАУ + силикат + композитные частицы

Характеристика пыли

- Поглощение, рассеяние и поляризация света
- Субмиллиметровое и ИК-излучение (охлаждение) и фотоэффект (нагрев)
- Поверхность для каталитических химических реакций
- Исходный материал для образования планет и органических соединений

Лекция 8

Космические лучи

Космические лучи - это элементарные частицы и ядра атомов, движущиеся с высокими энергиями в космическом пространстве.

В околоземном космическом пространстве (ОКП) различают несколько типов космических лучей. К стационарным принято относить галактические космические лучи (ГКЛ), частицы альбедо и радиационный пояс. К нестационарным — солнечные космические лучи (СКЛ)

Галактические космические лучи

Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из ядер различных химических элементов с кинетической энергией E более нескольких десятков МэВ/нуклон, а также электронов и позитронов с $E > 10$ МэВ. Эти частицы приходят в межпланетное пространство из межзвёздной среды. Наиболее вероятными источниками космических лучей считаются вспышки сверхновых звёзд и образующиеся при этом пульсары. Электромагнитные поля пульсаров ускоряют заряженные частицы, которые затем рассеиваются на межзвёздных магнитных полях. Возможно, однако, что в области $E < 100$ МэВ/нуклон частицы образуются за счёт ускорения в межпланетной среде частиц солнечного ветра и межзвёздного газа. Дифференциальный энергетический спектр ГКЛ носит степенной характер.

Частицы альбедо

Внутри магнитосферы, как и в любом дипольном магнитном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией E меньше критической. Те же частицы с энергией $E < E_{кр}$, которые всё-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещённые области магнитосферы называются зонами захвата. В зонах захвата дипольного (квазидипольного) поля Земли действительно удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего, протонов и электронов).

В околоземном пространстве можно выделить две торообразные области, расположенные в экваториальной плоскости примерно на расстоянии от 300 км (в зоне БМА) до 6000 км (внутренний РПЗ) и от 12 000 км до 40 000 км (внешний РПЗ). Основным наполнением внутреннего пояса являются протоны с высокими энергиями от 1 до 1000 МэВ, а внешнего — электроны.

Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях $L \sim 3$ радиусов Земли от её центра. Малоэнергичные электроны заполняют всю область захвата. Для них нет деления на внутренний и внешний пояса. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени.

Процесс взаимодействия ядер первичного космического излучения с атмосферой сопровождается возникновением нейтронов. Поток нейтронов, идущий от Земли (нейтроны альbedo), беспрепятственно проходит сквозь магнитное поле Земли. Поскольку нейтроны нестабильны (среднее время распада ~ 900 с), часть из них распадается в зонах, недоступных для заряженных частиц малых энергий. Таким образом, продукты распада нейтронов (протоны и электроны) рождаются прямо в зонах захвата. В зависимости от энергии и пич-углов эти протоны и электроны могут либо оказаться захваченными, либо покинуть эту область.

Частицы альbedo — это вторичные частицы, отражённые от атмосферы Земли. Нейтроны альbedo обеспечивают радиационный пояс протонами с энергией до 10^3 МэВ и электронами с энергией до нескольких МэВ

Солнечные космические лучи

Солнечными космическими лучами (СКЛ) называются энергичные заряженные частицы — электроны, протоны и ядра, — инжектированные Солнцем в межпланетное пространство. Энергия СКЛ простирается от нескольких кэВ до нескольких ГэВ. В нижней части этого диапазона СКЛ граничат с протонами высокоскоростных потоков солнечного ветра. Частицы СКЛ появляются вследствие солнечных вспышек.

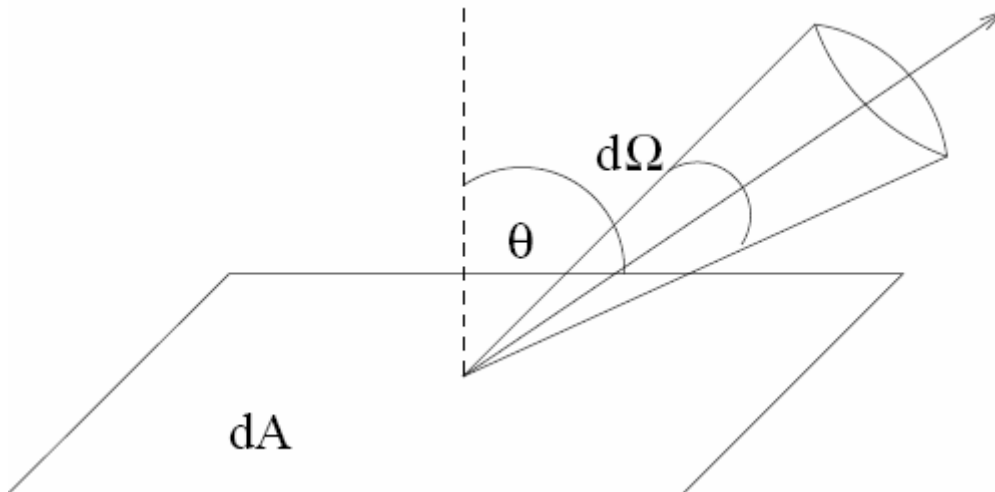
Перенос излучения в меж- и околозвездной средах. Уравнение переноса излучения Перенос излучения в межзвёздной и околозвёздной среде:

- Геометрическая оптика (за исключением некоторых аспектов взаимодействия с веществом)
- Показатель преломления равен единице
- Отличия от переноса излучения в звёздных атмосферах
 - Меньшая оптическая толщина; наблюдается спектр всего объёма, а не только поверхности
 - Иные источники излучения и поглощения
 - Иные приоритетные механизмы формирования линий и континуума

Двойная роль излучения

- Перенос энергии внутри объекта (РГД)
- Перенос информации от объекта в телескоп

Удельная интенсивность:



$$n_x = \sin \theta \cos \varphi$$

$$dE = I_\nu \cos \theta dA dt d\Omega d\nu \quad n_y = \sin \theta \sin \varphi$$

$$I_\nu = I(\vec{r}, \vec{n}, \nu, t) \quad n_z = \cos \theta$$

Интенсивность не зависит от расстояния

Средняя интенсивность и поток

$$J(\vec{r}, \nu, t) = \frac{1}{4\pi} \int I(\vec{r}, \vec{n}, \nu, t) d\Omega$$

$$F(\vec{r}, \nu, t) = \int I(\vec{r}, \vec{n}, \nu, t) \cos \theta d\Omega$$

От точечных объектов (звёзд) фиксируется поток, от протяжённых — интенсивность

Чернотельное (тепловое) излучение

$$I_\nu(\vec{n}) = B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$F_\nu = \pi B_\nu(T)$$

$$F = \int_0^\infty F_\nu d\nu = \sigma T^4$$

Перенос излучения с поглощением

$$dE_v = j_v dV d\Omega dt d\nu \quad dI_v = j_v ds \quad dV = dAd_s$$

$$dI_v = -\alpha_v I_v ds$$

$$\alpha_v = n\sigma_v$$

$$\alpha_v = \rho\kappa_v$$

$$\frac{dI_v}{ds} = -\alpha_v I_v + j_v$$

$$\vec{n} \cdot \nabla I_v(\vec{r}, \vec{n}) = j_v - \alpha_v I_v(\vec{r}, \vec{n})$$

Оптическая толщина и функция источников

$$\frac{dI_v}{ds} = j_v - \alpha_v I_v = j_v - \alpha_v B_v(T) \Rightarrow B_v(T) = \frac{j_v}{\alpha_v}$$

$$\frac{dI_v}{d\tau_v} = -I_v + S_v, \text{ где } S_v = \frac{j_v}{\alpha_v}$$

$$S_v = B_v(T)$$

$$d\tau_v = \alpha_v ds$$

$$\tau_v = \int \alpha_v ds$$

Решение уравнения переноса: проблемы, методы решения. Диффузионное приближение. Перенос излучения в пыли. Фактор эффективности экстинкции
 Формальное решение уравнения переноса

$$I_v(\tau_v) = I_v(0)e^{-\tau_v} + \int_0^{\tau_v} e^{-(\tau_v - \tau'_v)} S(\tau'_v) d\tau'_v$$

Методы решения уравнения переноса

- **Метод лямбда-итераций**
 - Выбор начального приближения для средней интенсивности
 - Интегрирование уравнения переноса вдоль большого количества лучей и использование полученных результатов для вычисления нового приближения для J_n
 - Проверка условия сходимости
- **Метод Монте-Карло**
 - Прослеживание траекторий отдельных (пакетов) фотонов

– Генерация достаточного количества фотонов для получения статистически значимой выборки траекторий

- Разделение на два этапа:
- — вычисление функции источников
- — интегрирование уравнения переноса в направлениях, проходящих через детектор

Метод лямбда-итераций

$$J_\nu = \Lambda[S_\nu]$$

$$S_\nu = \omega_\nu \Lambda[S_\nu] + (1 - \omega_\nu) B_\nu(T)$$

$$S_\nu^{n+1} = \omega_\nu \Lambda[S_\nu^n] + (1 - \omega_\nu) B_\nu(T)$$

$$J_i = \sum_{j=1}^N \Lambda_{ij} S_j$$

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ J_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \Lambda_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Lambda_{N1} & \cdot & \cdot & \cdot & \Lambda_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_N \end{pmatrix}$$

Диффузионное приближение

$$\frac{1}{3} \nabla \left(\frac{1}{\chi_\nu} \nabla J_\nu \right) = \chi_\nu J_\nu - j_\nu$$

$$\frac{1}{3} \nabla \left(\frac{1}{\chi_\nu} \nabla J_\nu \right) = \alpha_\nu (J_\nu - B_\nu(T))$$

$$K_\nu^{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} J_\nu$$

Простые случаи переноса излучения в пыли

Перенос излучения в пылевой среде

$$\frac{dI_v}{ds} = \chi_v(S_v - I_v)$$

$$S_v = \frac{J_v^{sca} + J_v^{emis}}{\sigma_v + \alpha_v}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{geom} &= \pi a^2 \\ \alpha_v &= Q_{ext} n \sigma_{geom} \\ x &= \frac{2\pi a}{\lambda} \\ Q_{ext} &= Q_{abs} + Q_{sca} \end{aligned} \quad Q_{abs} = \begin{cases} 1 & \text{для } \lambda \leq 2\pi a \\ \frac{2\pi a}{\lambda} & \text{для } \lambda > 2\pi a \end{cases}$$

$$Q_{sca} = \begin{cases} 1 & \text{для } \lambda \leq 2\pi a \\ \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^4 & \text{для } \lambda > 2\pi a \end{cases}$$

Простые случаи пылевого излучения

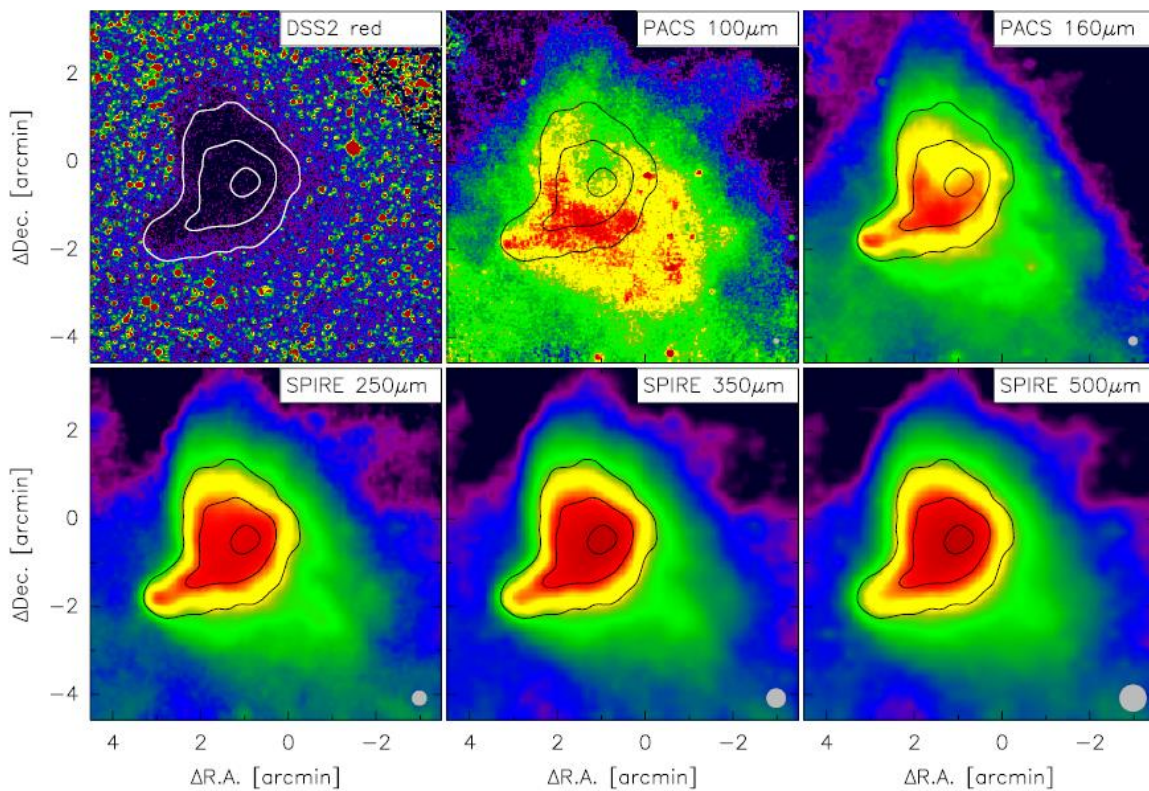


Рисунок 6.1. Простой случай пылевого излучения

$$I_v(\tau_v) = I_v(0)e^{-\tau_v} + \int_0^{\tau_v} e^{-(\tau_v - \tau'_v)} S(\tau'_v) d\tau'_v = \tau_v B_v(T_d)$$

Перенос излучения в молекулярных линиях. Критические плотности переходов. Методы решения уравнения переноса в линиях. Параметры для решения уравнения переноса

Перенос излучения в линиях

$$\frac{dI_\nu}{ds} = j_\nu - \alpha_\nu I_\nu$$

- Спонтанное излучение (A_{ul})
- Поглощение (B_{lu})
- Вынужденное излучение (B_{ul})

$$j_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} n_u A_{ul} \varphi(\nu), \quad \alpha_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} (n_l B_{lu} - n_u B_{ul}) \varphi(\nu)$$

$$A_{ul} = \frac{2h\nu^3}{c^2} B_{ul}, \quad g_l B_{lu} = g_u B_{ul}$$

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

$$\alpha_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} n_l B_{lu} \left(1 - \frac{g_l n_u}{g_u n_l}\right) \varphi(\nu)$$

$$S_\nu = \frac{n_u A_{ul}}{n_l B_{lu} - n_u B_{ul}} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\frac{g_u n_l}{g_l n_u} - 1\right)^{-1}$$

Где, n_l, n_u — населённости уровней

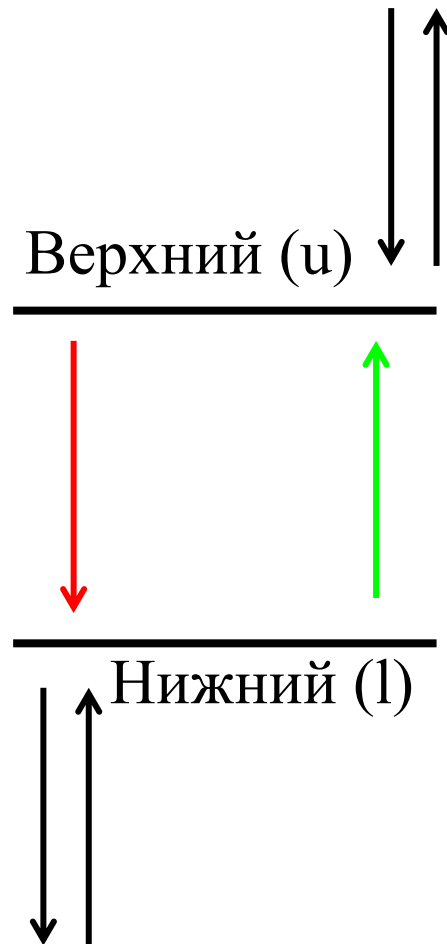


Рисунок 8.2. Схема распределения уровней

Критическая плотность

$$n_l n C_{lu} = n_u (A_{ul} + n C_{ul})$$

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{n C_{lu}}{A_{ul} + n C_{ul}} = \frac{\exp(-h\nu/kT)}{1 + n_{cr}/n}$$

$$n_{cr} = A_{ul} / C_{ul}$$

n — плотность (концентрация) столкновительных партнёров

Если плотность превышает критическую, населённость уровней определяется столкновениями более, чем спонтанным излучением

Методы решения уравнения переноса

- ЛТР
- Вероятность выхода
- LVG
- Честный

$$\alpha_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} n_l B_{lu} \left(1 - \frac{g_l n_u}{g_u n_l} \right) \varphi(\nu)$$

$$S_\nu = \frac{n_u A_{ul}}{n_l B_{lu} - n_u B_{ul}} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\frac{g_u n_l}{g_l n_u} - 1 \right)^{-1}$$

$$(n_l B_{lu} - n_u B_{ul}) J_\nu = n_u (1 - \beta(\tau_{ul})) A_{ul}$$

$$n_l n C_{lu} = n_u n C_{ul} n_u + \beta(\tau_{ul}) A_{ul}$$

$$\beta(\tau) = \frac{1 - \exp(-2.34\tau)}{4.68\tau}$$

Физические условия в межзвездной среде. Источники нагрева и охлаждения межзвездного вещества

Физические условия в МЗС

- Определяются балансом процессов нагрева и охлаждения
- Нагрев — внешние процессы (космические лучи, излучение звёзд, сверхновые)
- Охлаждение — внутренние процессы (потери энергии с излучением)

Чтобы оценить физическое состояние МЗС, необходимо определить, при каких условиях **скорость нагрева равна скорости охлаждения**

Нагрев

- Нагрев электромагнитным излучением
 - Фотозэффект (пыль, ПАУ)
 - Фотоионизация (С, Н)

- Фотодиссоциация (H_2)
- Нагрев космическими лучами (и рентгеном)
- Сверхновые
- Турбулентный нагрев
- Работа сил гравитации

Нагрев

- Нагрев электромагнитным излучением
 - Фотоионизация (C, H)
 - Фотоэффект (пыль, ПАУ)
 - Фотодиссоциация (H_2)
- Нагрев космическими лучами и рентгеном
- Сверхновые
- Турбулентный нагрев
- Работа сил гравитации
- $G = G(n)$

Итог: функция нагрева

Охлаждение

- Столкновительное возбуждение
- Спонтанное излучение
- Поглощение (радиативное возбуждение)
- Столкновительная релаксация
- Вынужденное излучение

Излучение газа — не только источник информации о нём, но и причина его остывания

Условия эффективного охлаждения

- Охладитель есть в среде, и его много

- Энергия возбуждения сравнима с тепловой энергией
- Фотон успевает излучиться до столкновительной релаксации
- Фотон беспрепятственно уходит из среды, охладителя не слишком много

Лекция 9

Распространенность химических элементов (Р.э.) и соединений во Вселенной. Спектры гелия и водорода. Электронное строение атома. Тонкая и сверхтонкая структура водородоподобного атома

Помимо водорода и гелия, которые заполняют всё пространство, по массе и по объему следующими элементами по распространённости являются углерод, кислород и соответственно азот.

То есть это относительное среднее содержание (иногда говорят обилие) данного химического элемента (нуклида) в космическом веществе. Под Р.э. часто понимают не только содержание количество химического элемента, но также и его отдельных устойчивых изотопов. Р.э. определяется на основании совокупности всех данных космохимии: изучения спектров Солнца и звезд, состава первичных космических лучей, химических анализов метеоритов, лунного грунта, а также данных геохимии. Распространенность водорода и гелия оценивается с привлечением косвенных данных: расчетов внутреннего строения звезд и выводов космологии. Указаны также различные процессы образования элементов, рассматриваемые в ядерной астрофизике. Наибольшую распространенность имеет водород, за ним следует гелий (в земных и лунных породах, а также в метеоритах этих элементов мало, отсюда они улетучились).

Дуговой спектр гелия состоит из небольшого числа линий, расположенных в спектральной области между 10800 и 2700 Å спектральной области между 584 и 508 Å (крайний ультрафиолет). Рунге и Пашен разбили спектральные линии гелия на две независимые серии и на основании этого высказали предположение, что для гелия характерны два состояния: парагелий, которому принадлежат одиночные линии, и ортогелий, которому принадлежат дублеты (двойные линии).

В электронной оболочке любого атома ровно столько электронов, сколько протонов в его ядре, поэтому атом в целом электронейтрален. Электроны в атоме заселяют ближайшие к ядру уровни и подуровни, потому что в этом случае их энергия меньше, чем если бы они заселяли более удаленные уровни. На каждом уровне и подуровне может помещаться только определенное количество электронов.

Тонкая структура (мультиплетное расщепление) — явление в атомной физике, описывающее расщепление спектральных линий (уровней энергии, спектральных терм) атома.

Макроскопическая структура спектральных линий — это число линий и их расположение. Она определяется разницей в энергетических уровнях различных атомных орбиталей. Однако при более детальном исследовании каждая линия проявляет свою детальную тонкую структуру. Эта структура объясняется малыми взаимодействиями, которые немного сдвигают и расщепляют энергетические уровни. Их можно анализировать методами теории возмущений. Тонкая

структура атома водорода на самом деле представляет собой две независимые поправки к боровским энергиям: одна из-за релятивистского движения электрона, а вторая из-за спин-орбитального взаимодействия.

Молекулярный гамильтониан. Моделирование спектров в астрохимии

В атомной, молекулярной и оптической физики и квантовой химии, гамильтонианом молекулы является гамильтонов оператор, представляющий энергию из электронов и ядер в молекуле. Этот оператор и связанное с ним уравнение Шредингера играют главную роль в вычислительной химии и физике для выявления свойств молекул и агрегатов молекул, такие, как теплопроводность, удельная теплоемкость, электропроводность, оптические и магнитных свойства и реакционная способность.

Элементарные части молекулы являются ядрами, характеризующиеся их атомными номерами, Z , и электронов, которые имеют отрицательный элементарный заряд. Их взаимодействие дает ядерный заряд. Электроны и ядро, в очень хорошем приближении, это точечные заряды и точечные массы. Гамильтониан молекулы представляет собой сумму нескольких слагаемых: кинетическая энергия электронов и (электростатических) кулоновских взаимодействий между двумя видами заряженных частиц. Гамильтониан, который содержит только кинетическую энергию электронов и ядер, и кулоновские взаимодействия между ними, известен как кулоновский гамильтониан.

Несмотря на то, что, как правило, предполагается, что решение стационарного уравнения Шредингера, связанного с кулоновским гамильтонианом будет предсказывать большинство свойств молекулы, в том числе его формы (трехмерную структуру), расчеты, основанные на полном кулоновском гамильтониане очень редки. Основная причина заключается в том, что его уравнение Шредингера очень трудно решить. Приложения ограничены в небольшие системы, такие как молекулы водорода.

Почти все расчеты молекулярных волновых функций основаны на разделении кулоновского гамильтониана. Ядерные кинетические энергия термины опущены из кулоновского гамильтониана и рассматривается как оставшийся гамильтониан. Стационарные ядра вводят проблему только в качестве генераторов электрического потенциала, в котором электроны двигаются по квантовому механическому принципу. В этих рамках гамильтониан молекулы был упрощен для так называемого зафиксированного ядра Гамильтона, также называемого электронным гамильтонианом, который действует только на функции электронных координат.

Эволюция космического вещества.

Одна из важнейших задач астрохимии — изучение на основе состава и распространённости химических элементов эволюции космических тел, стремление объяснить на химической основе их происхождение и историю. Наибольшее внимание в космохимии уделяется проблемам распространённости и распределения химических элементов. Распространённость химических элементов в космосе определяется нуклеосинтезом внутри звёзд.

Химический состав Солнца, планет земного типа Солнечной системы и метеоритов, по-видимому, практически тождествен. Образование ядер химических элементов связано с различными ядерными процессами в звёздах. Поэтому на разных этапах своей эволюции различные звёзды и звёздные системы имеют неодинаковый химический состав. Известны звёзды с особенно сильными спектральными линиями Ва или Mg или Li и др.

С развитием астрофизики и некоторых других наук расширились возможности получения информации, относящейся к космохимии. Так, поиски молекул в межзвёздной среде ведутся посредством методов радиоастрономии. К концу 1972 в межзвёздном пространстве обнаружено более 20 видов молекул, в том числе несколько довольно сложных органических молекул, содержащих до 7 атомов. Установлено, что наблюдаемые концентрации их в 10—100 млн раз меньше, чем концентрация водорода. Эти методы позволяют также посредством сравнения радиочастотных изотопных разновидностей одной молекулы (например, H_2^{12}CO и H_2^{13}CO) исследовать изотопный состав межзвёздного газа и проверять правильность существующих теорий происхождения химических элементов.

Исключительное значение для познания химии космоса имеет изучение сложного многостадийного процесса конденсации вещества низкотемпературной плазмы, например перехода солнечного вещества в твёрдое вещество планет Солнечной системы, астероидов, метеоритов, сопровождающегося конденсационным ростом, аккрецией (увеличением массы, «нарастанием» любого вещества путём добавления частиц извне, например из газопылевого облака) и агломерацией первичных агрегатов (фаз) при одновременной потере летучих веществ в вакууме космического пространства. В космическом вакууме, при относительно низких температурах (5000—10000 °C), из остывающей плазмы последовательно выпадают твёрдые фазы разного химического состава (в зависимости от температуры), характеризующиеся различными энергиями связи, окислительными потенциалами и т. п. Например, в хондритах различают силикатную, металлическую, сульфидную, хромитную, фосфидную, карбидную и другие фазы, которые агломерируются в какой-то момент их истории в каменный метеорит и, вероятно, подобным же образом и в вещество планет земного типа.

Лекция 10

Основные виды химических реакций в межзвездной среде. Первые молекулы, образовавшиеся в космосе

Особенность химических реакций в межзвездной среде — доминирование двухчастичных процессов: стехиометрические коэффициенты всегда равны единице. Поначалу единственным путем к формированию молекул казались реакции «радиативной ассоциации»: чтобы два атома, столкнувшись, объединились в молекулу, необходимо отвести избыточную энергию. Если молекула, сформировавшись в возбужденном состоянии, успевает до распада излучить фотон и перейти в невозбужденное состояние, она сохраняет устойчивость. Расчеты, проведенные до 1950-х годов, показывали, что наблюдаемое содержание трех этих простых молекул вроде бы удастся объяснить в предположении, что они формируются в реакциях радиативной ассоциации и разрушаются межзвездным полем излучения — совокупным полем излучения звезд Галактики.

Круг забот астрохимии в то время был не особенно широк, по крайней мере в межзвездной среде: три молекулы, с десятков реакций между ними и их составными элементами. Ситуация перестала быть спокойной в 1951 году, когда Дэвид Бэйтс и Лайман Спитцер пересчитали равновесные содержания молекул с учетом новых данных о скоростях реакций радиативной ассоциации. Оказалось, что атомы связываются в молекулы гораздо медленнее, чем считалось до этого, и потому простая модель промахивается в предсказании содержания CN и CN^+ на порядки величины. Тогда они предположили, что две из этих молекул появляются не в результате синтеза из атомов, а в результате разрушения более сложных молекул, конкретно — метана. А откуда взялся метан? Ну, он мог образоваться в звездных атмосферах, а потом попасть в межзвездную среду в составе пылинок.

В диапазоне значений красного смещения от 2000 до 800 в космической плазме помимо атомов гелия-4, оставалось еще достаточно протонов. Они и составили первичное сырье для реакции радиационной ассоциации, в ходе которой при столкновении протона с атомом гелия появлялся ион гидрида гелия и испускался фотон:



За ней последовали аналогичные реакции с участием атомов водорода и протонов, которые привели к появлению молекулярного водорода. И это было лишь началом, вскоре число реакций пошло на десятки. Так что ион гидрида гелия оказался первым сложным (всего лишь двухатомным, но все же!) веществом, появившимся в нашей Вселенной. Более того, эти ионы начали синтезироваться (хотя и в совершенно

ничтожных концентрациях) уже при $z = 7000$, когда после Большого взрыва прошло лишь 30 тысяч лет.

Поскольку ионы HeH^+ присоединяли электроны, их возникновение шло рука об руку с последующей нейтрализацией (как говорят астрономы, рекомбинацией). Однако нейтральные молекулы гидрида гелия HeH в основном состоянии нестабильны и потому недолговечны. В результате концентрация ионов HeH^+ сначала возрастала, а потом начала падать. Она достигла максимума, когда Вселенная подросла до полумиллиарда лет. Впрочем, и в это время их расчетная доля по отношению к атомам водорода составляла всего 10–13–10–14.

Красное смещение.

Красное смещение — явление, при котором электромагнитное излучение увеличивает свою длину волны (например, свет становится более красным), соответственно, его частота и энергия уменьшается. Противоположное, но аналогичное по своей природе явление называется синим смещением.

Есть и другие эффекты, которые могут приводить к видимому покраснению, но имеют совершенно другую природу и проявляются по-другому, например, межзвёздное покраснение.

Термодинамические условия. Ионная рекомбинация, ион-нейтральное равновесие

Термодинамическое равновесие — состояние системы, при котором остаются неизменными во времени макроскопические величины этой системы (температура, давление, объём, энтропия) в условиях изолированности от окружающей среды

Если в газе существуют отрицательные ионы, которые могли образоваться при захвате электронов нейтральными молекулами или при диссоциации, то возможна ион-ионная рекомбинация.

Как и в случае ион-ионной рекомбинации, возможны различные процессы нейтрализации. Например, ион может захватить приблизившийся к нему электрон, образуя нейтральный атом или молекулу в основном состоянии, а энергия рекомбинации при этом испускается в виде кванта. Если электрон имеет пренебрежимо малую кинетическую энергию, то квант испускается с энергией.

Отрицательные ионы регистрируют, используя более высокую вероятность ион-ионной рекомбинации по сравнению с электрон-ионной в чистом газе-носителе (на этом принципе основаны прежде всего ЭЗД, выпускаемые промышленностью), либо используя различия в подвижности электронов, непосредственно отделяют отрицательные ионы.

В газах, способных в той или иной степени образовывать отрицательные ионы, рекомбинация электронов и положительных ионов происходит в основном

ступенчатым путём свободных электронов сперва присоединяются к нейтральным молекулам, образуя с ними отрицательные ионы затем при встрече отрицательного иона с положительным происходит их взаимная рекомбинация

Лекция 11

Условия эффективного охлаждения; основные охладители. Зоны ионизованного водорода

Основные охладители:

- Ионы углерода, кислорода, азота, серы, кремния
- Нейтральные атомы кислорода, углерода
- Молекулы оксида углерода, воды, гидроксила...

$$n_{\text{H}} = 10^{-3} - 10^6 \text{ см}^{-3}$$

$$T = 10 - 10^6 \text{ К}$$

$$x_e = 0 - 1$$

Хотя основным элементом МЗС является водород, оставшийся после первичного нуклеосинтеза, её физическое состояние определяется, главным образом, примесными химическими элементами

$$L(n, T) = n^2 \Lambda(T)$$

Зоны ионизованного водорода

$$R_s = \left(\frac{3N_{\text{Lyc}}}{4\pi n^2 \beta} \right)^{1/3}$$

Таблица 11.1. Зоны ионизованного водорода

Спектр	T_{eff} (К)	L (10^5 L_{\odot})	N_{Lyc} (10^{49} фотонов с^{-1})	R_s (пк)
O3	51200	10.8	7.4	130
O4	48700	7.6	5.0	120
O5	46100	5.3	3.4	100

O6	43600	3.7	2.2	88
O7	41000	2.5	1.3	75
O8	38500	1.7	0.74	62
O9	35900	1.2	0.36	49
B0	33300	0.76	0.14	36

Двухфазная модель МЗС. Фазы МЗС. Распределение газов в Галактике

Двухфазная модель МЗС

В простейшей двухфазной модели в некотором интервале давлений нейтральная МЗС распадается на две устойчивые фазы (находящиеся в равновесии давлений): плотную холодную («облака»), $T \sim 100$ К,

$n \sim 10$ см⁻³, и разреженную горячую («межоблачная среда»), $T \sim 10^4$ К, $n \sim 0.1$ см⁻³

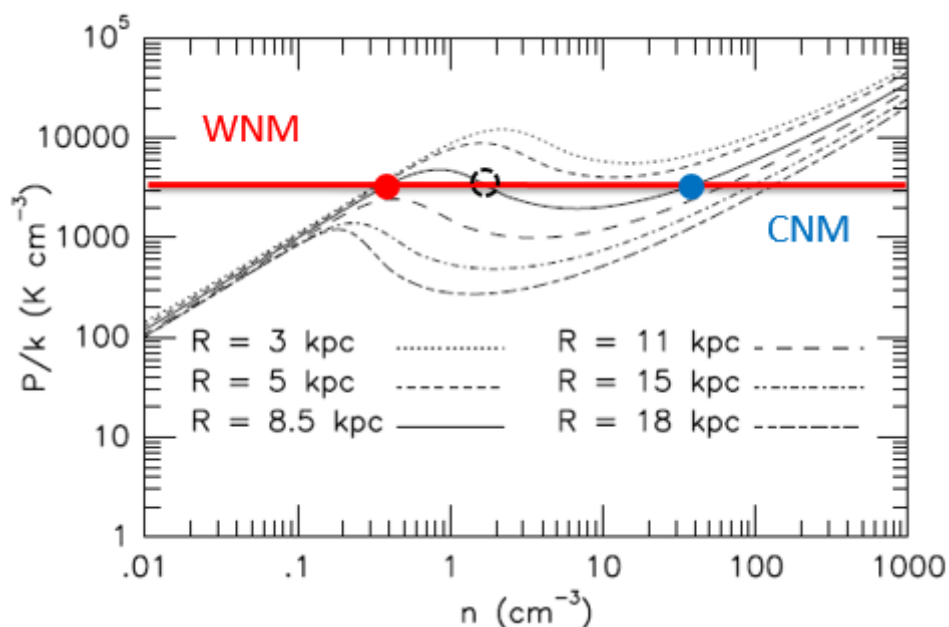


Рисунок 11.2. Двухфазная модель МЗС

- ✓ *WNM* — теплая нейтральная среда
- ✓ *CNM* — холодная нейтральная среда

Итог: нагрев: космические лучи и неионизирующее излучение.

Фазы межзвёздной среды

Таблица 11.1. Таблица фаз

<u>Компонент</u>	<u>$n, \text{см}^{-3}$</u>	<u>T, K</u>	<u>$f, \%$</u>	<u>$M,$ <u>млрд. M_{\odot}</u></u>
<u>Горячая межоблачная среда (корона)</u>	<u>0.003</u>	<u>10^6</u>	<u>50</u>	<u>—</u>
<u>Теплая ионизованная среда</u>	<u>0.1</u>	<u>8000</u>	<u>25</u>	<u>1.0</u>
<u>Теплая нейтральная среда</u>	<u>0.5</u>	<u>8000</u>	<u>25</u>	<u>2.8</u>
<u>Холодная нейтральная среда</u>	<u>50</u>	<u>80</u>	<u>1</u>	<u>2.2</u>
<u>Молекулярные облака</u>	<u>>200</u>	<u>10– 50</u>	<u>0.05</u>	<u>1.3</u>

- ✓ *Чем плотнее, тем темнее.*
- ✓ *Чем темнее, тем холоднее.*

Самые плотные и насыщенные по своему составу (тяжелые) облака, это молекулярные облака.

Молекулярные облака

- Массы — до $6 \cdot 10^6 M_{\odot}$

- Размеры — десятки пк
- Температура — 10–50 К
- Плотность — более 200 см^{-3}

Местная межзвездная среда. Местный Пузырь и Пояс Гулда

Местная межзвёздная среда

- Измерения внутри Солнечной системы
- «Вояджер-1» и «Вояджер-2» — непосредственные измерения



Рисунок 11.2. Строение местной МЗС

Пояс Гулда

Пояс Гулда — группа очень молодых массивных звёзд возрастом 10—30 млн лет, формирующая диск диаметром 500—1000 пк, центр которого находится на расстоянии 150—250 пк от Солнца в направлении антицентра Галактики. Назван в честь Бенджамина Гулда, впервые обратившего в 1879 году внимание на то, что яркие звёзды на небе образуют пояс, наклонённый к плоскости Млечного Пути.

Пояс содержит яркие звёзды многих созвездий, включая в порядке с запада, а затем в восточном направлении созвездия: Цефея, Ящерицы, Персея, Ориона, Большого Пса, Кормы, Паруса, Киля, Южного Креста, Центавра, Волка и Скорпиона (включая ОВ-ассоциацию Скорпиона-Центавра). Млечный Путь также проходит через большинство этих созвездий, но немного юго-восточнее. История локальной межзвёздной среды и

локального звездообразования на расстоянии до нескольких сот парсек и за период в несколько десятков миллионов лет почти полностью определяется поясом Гулда.

Астрономы Гарвардского университета (США) при помощи космического телескопа Gaia выяснили, что пояс Гулда является частью более крупной структуры протяженностью 9 тысяч световых лет.

Есть несколько теорий о происхождении пояса Гулда. Одна утверждает, что пояс Гулда сформировался в результате ударной волны, возникшей 50—60 миллионов лет назад из-за столкновения молекулярного облака с галактическим диском, центр которой находится в созвездии Персея. Также есть теория, утверждающая, что ударная волна начала расширяться и гравитационно дестабилизировала несколько молекулярных облаков, в которых начался процесс интенсивного звездообразования. Считается, что к расширению пояса Гулда причастны один или несколько взрывов сверхновых, в результате которых 10 миллионов лет назад образовался Местный пузырь, в котором наше Солнце находится в настоящее время.

В конце 2000-х годов появилась теория, которая утверждает, что пояс Гулда образовался около 30 миллионов лет назад, когда сгусток тёмной материи столкнулся с молекулярным облаком в нашем регионе.

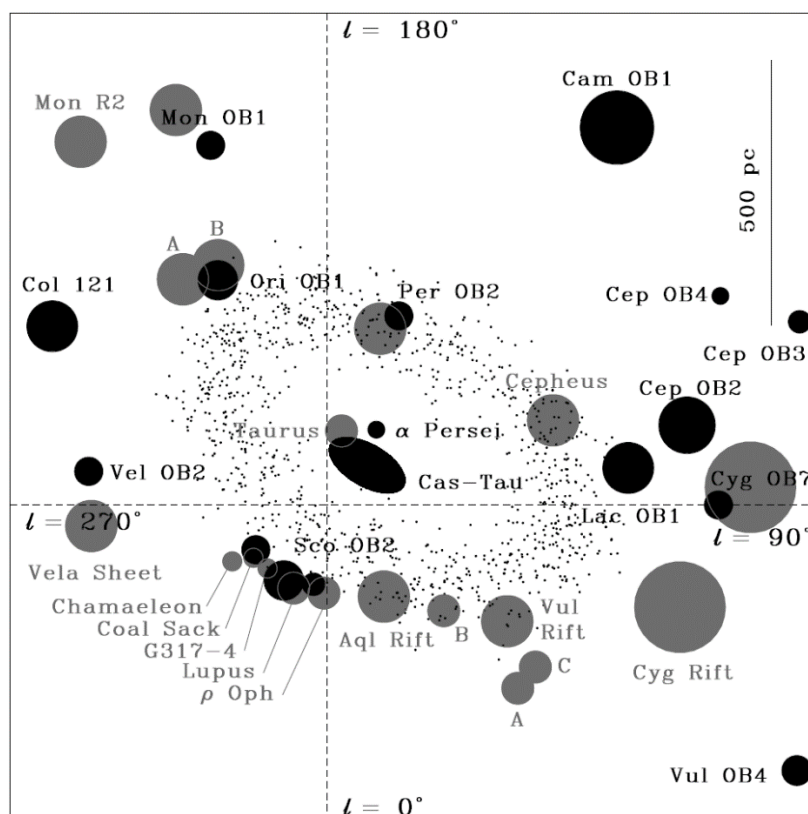


Рисунок 11.3. Карта Пояса Гулда

Астрохимически важные параметры МЗС

Астрохимически важные параметры МЗС

- Плотность и температура
- Элементный состав
- Интенсивность поля излучения (G_0 , U , χ)
- Скорость ионизации космическими лучами (ζ)
- Оптическая экстинкция (A_V)

Лекция 12

Спектральные классы объектов Вселенной

Классификация звёзд по спектру излучения, в первую очередь, по температуре фотосферы. Различия в спектрах звёзд обуславливаются различием физических свойств их атмосфер, в основном, температуры и давления (определяющих степень ионизации атомов). Вид спектра зависит также от наличия магнитных и межатомных электрических полей, различий в химическом составе, вращения звёзд и от других факторов.

Сплошной спектр излучения звезды близок к излучению абсолютно чёрного тела с температурой, равной температуре её фотосферы, которую можно оценить по закону смещения Вина, но для удалённых звёзд этот метод неприменим из-за неравномерного поглощения света различных участков спектра межзвёздной средой. Более точным методом является оптическая спектроскопия, позволяющая наблюдать в спектрах звёзд линии поглощения, имеющие различную интенсивность в зависимости от температуры и типа звезды. Для некоторых типов звёзд в спектрах наблюдаются и линии испускания

- Класс I — белые и голубые звёзды с широкими линиями поглощения водорода в спектре, такие, как Вега и Альтаир; включает в себя современные классы A и начало класса F.
- Класс I, подтип Ориона — звёзды класса I с узкими линиями в спектре вместо широких полос, такие, как Ригель и γ Ориона; соответствует началу современного класса B.
- Класс II — жёлтые и оранжевые звёзды со слабыми линиями водорода, но с отчётливыми линиями металлов, такие, как Солнце, Арктур и Капелла; включает в себя современные классы G и K, а также конец класса F.
- Класс III — оранжевые и красные звёзды, в спектре которых линии образуют полосы, темнеющие в сторону синего, такие, как Бетельгейзе и Антарес; соответствует современному классу M.
- Класс IV — красные звёзды с сильными полосами и линиями углерода, углеродные звёзды.
- Класс V — звёзды с эмиссионными линиями, такие, как γ Кассиопеи и β Лиры

Молекулы в горячих, остывших звездах, в оболочках старых звезд. Мазерное излучение

Польза от солнечных молекул

- Интерпретация других линий
- Определение содержания изотопов ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$)
- Измерение конвективных движений

- Измерение содержания кислорода

Мазерное излучение

Мазер основан на принципе вынужденного излучения, предложенном Альбертом Эйнштейном в 1917 году. Когда атомы возбуждены, они могут усиливать излучение на частоте, определенной для элемента или молекулы, которые используются в качестве среды (по аналогии с тем, что происходит в среде генерации в лазере).

Поставив такую усиливающую среду в резонансной полости, создаем обратную связь, которая может производить когерентное излучение.

- Открытие — 1965 год, мазеры гидроксила.
- Очень большая яркостная температура
- Компактность
- Переменность
- Поляризация

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$h\nu \ll kT$$

$$I_\nu = \frac{2\nu^2 kT}{c^2}$$

$$T_b = \frac{I_\nu c^2}{2k\nu^2}$$

Образование пыли в проэволюционировавших звездах (кислородных, углеродных). Выживание молекул в протопланетарных и планетарных туманностях. Происхождение и разрушение пыли

Образование пыли в проэволюционировавших звёздах

- Силикатная пыль (SiO, MgO, MgS...)
- Графитовая пыль (C₂H₂, C₂H, SiC...)
- Полициклические ароматические углеводороды (C₂H₂)

Образование пыли в кислородных звёздах

При 1500 К

- Оксид алюминия, Al₂O₃

- Шпинель, $MgAl_2O_4$, геленит, $Ca_2Al_2SiO_7$
- Оксид кремния, SiO
- Форстерит, Mg_2SiO_4 , энстатит, $Mg_2[Si_2O_6]$

При 1000 К

- Оливин, $(Mg,Fe)_2SiO_4$, пироксен, $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$
- Диопсид, $CaMgSi_2O_6$

Разрушение пыли

- Сверхзвуковая турбулентность (ударные волны)
- Излучение
- Космические лучи
- **Взрывы сверхновых (ударные волны + горячий газ)**

Разбрызгивание (sputtering)

Дробление (shattering)

Испарение

Фотодесорбция

Эволюция остатка сверхновой

- Стадия свободного разлёта (~100 лет)
- Стадия адиабатического расширения (Седова, Седова-Тейлора, 10000 лет)
- Радиативная стадия (стадия снегоочистителя)

Проблема дисбаланса пыли. Гамма-всплески. Пыль на больших красных смещениях. Субмиллиметровые галактики. Образование пылинок в сверхновых.

Трансформация пылинок

(Дис)баланс пыли

- Jones et al. (1996): характерное время поступления пыли в МЗС — $2.5 \cdot 10^9$ лет, характерное время жизни пылинок — $6 \cdot 10^8$ лет для графита и $4 \cdot 10^8$ лет для силикатов
- Rowlands et al. (2014): масса пыли, производимой звёздами малых и промежуточных масс, в 240 раз уступает массе пыли, наблюдаемой в субмиллиметровых галактиках

Таким образом мы приходим к проблеме дисбаланса были связанной с тем, что разрушение пылинок должно в нашей Галактике происходить существенно более быстрее их формирования.

Пути к решению

- В локальной Вселенной
 - Преувеличен темп разрушения пылинок сверхновыми
 - Учтены не все механизмы образования
- В галактиках на больших z
 - Учтены не все механизмы образования

Лекция 13

Круговорот вещества в межзвездной среде. Молекулярные облака, темная материя, кривая вращения галактики.

Круговорот вещества в МЗС:

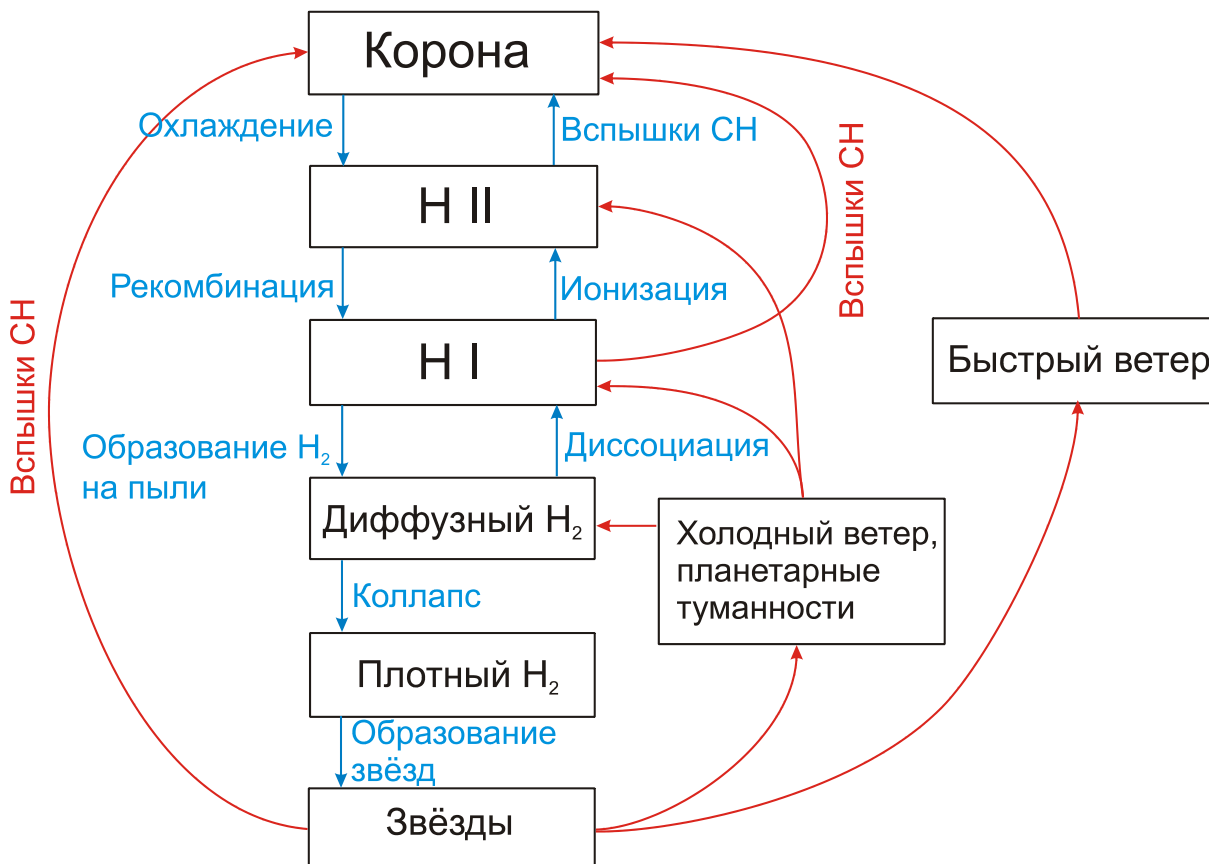


Рисунок 13.1. Круговорот вещества

Молекулярный водород трудно зарегистрировать при помощи инфракрасных или радионаблюдений, поэтому для определения наличия H_2 используют другую молекулу — CO (монооксид углерода). Соотношение между светимостью CO и массой H_2 , как полагают, остаётся постоянным, хотя есть причины сомневаться в правдивости этого в некоторых галактиках.

Значительный размер и масса молекулярного облака приводит к эффекту гравитационной неустойчивости, из-за которого плотность вещества внутри облака становится неравномерной. В областях с повышенной плотностью при определённых условиях вещество начинает сближаться. Сближение может приобрести такую силу и скорость, что происходит гравитационный коллапс, следствием которого может стать образование новой звезды.

Тёмная материя в астрономии и космологии, а также в теоретической физике — гипотетическая форма материи, не участвующая в электромагнитном взаимодействии и поэтому недоступная прямому наблюдению. Составляет порядка четверти массы-энергии Вселенной и проявляется только в гравитационном взаимодействии. Понятие тёмной материи введено для теоретического объяснения проблемы скрытой массы в эффектах аномально высокой скорости вращения внешних областей галактик и гравитационного линзирования (в них задействовано вещество, масса которого намного превышает массу обычной видимой материи); среди прочих предложенных оно наиболее удовлетворительно.

Состав и природа тёмной материи на настоящий момент неизвестны. В рамках общепринятой космологической модели наиболее вероятной считается модель холодной тёмной материи. Наиболее вероятные кандидаты на роль частиц тёмной материи — вимпы. Несмотря на активные поиски, экспериментально они пока не обнаружены.

Кривая вращения Галактики

$$\omega = \frac{v}{r} \Rightarrow v = \omega r$$

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

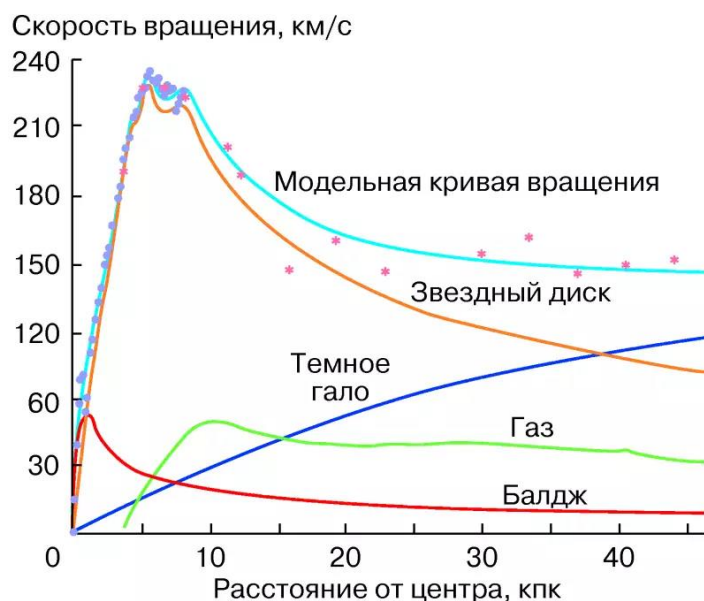


Рисунок 13.2. График кривой вращения Галактики

Исследования молекул в молекулярных облаках: актуальность, синтез теории и эксперимента, расчеты, способы наблюдения и извлекаемая информация

Интерес к молекулярным облакам

- Диагностика
- Тепловой баланс
- Астробиология

Результат вычислений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) = -\operatorname{div} \left\{ \rho \vec{v} \left(\frac{v^2}{2} + \omega \right) \right\},$$

Плотность, температура (давление) → Молекулярный состав → Перенос излучения

Список известных межзвёздных и околозвёздных молекул

Молекулы из двух атомов

- ✓ *AlF AlCl C₂ CH CH⁺ CN CO CO⁺ CP CS SiC HCl H₂ KCl NH NO NS NaCl OH PN SO SO⁺ SiN SiO SiS HF SH SH⁺ O₂ HCl⁺ OH⁺ CN⁻ AlO HCl⁺ ArH⁺ NO⁺ CrO TiO*

Молекулы из трех атомов

- ✓ *C₃ C₂H C₂O C₂S CH₂ HCN HCO HCO⁺ HCS⁺ HOC⁺ H₂O H₂S HNC HNO MgCN MgNC N₂H⁺ N₂O NaCN OCS SO₂ c-SiC₂ CO₂ NH₂ H₃⁺ SiCN FeCN KCN H₂Cl⁺ H₂O⁺ AlOH HO₂ CCN SiCSi TiO₂*

Молекулы из четырех атомов

- ✓ *c-C₃H l-C₃H C₃N C₃O C₃S C₂H₂ HCCN HCNH⁺ HNCO HNCS HOCO⁺ H₂CO H₂CN H₂CS H₃O⁺ NH₃ SiC₃ H₂O₂ HSCN PH₃ l-C₃H⁺ HMgNC MgCCH NCCP HCCO*

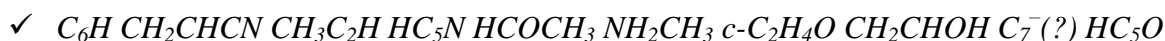
Молекулы из пяти атомов

- ✓ *C₅ C₄H C₄Si l-C₃H₂ c-C₃H₂ CH₂CN CH₄ HC₃N HC₂NC HCOOH H₂CHN H₂C₂O H₂NCN HNC₃ SiH₄ H₂COH⁺ CH₃O HNCNH H₂NCO⁺ NCCNH⁺*

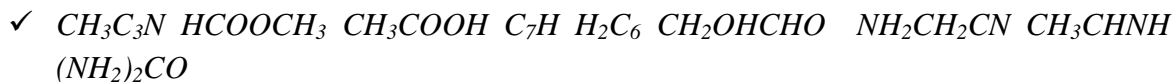
Молекулы из шести атомов

- ✓ *C₅H C₅O C₂H₄ CH₃CN CH₃NC CH₃OH CH₃SH HC₃NH⁺ HC₂CHO HCONH₂ l-H₂C₄ C₅N C₅N⁻ e-HNCHCN C₅S SiH₃CN CH₃NCO*

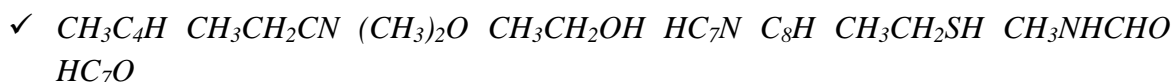
Молекулы из семи атомов



Молекулы из восьми атомов



Молекулы из девяти атомов



Молекулы из десяти атомов



Молекулы из одиннадцати атомов HC_9N C_2H_5OCHO CH_3COOCH_3

Молекулы из двенадцати атомов $CH_3OC_2H_5$ C_3H_7CN

Молекулы из тринадцати атомов $HC_{11}N?$

Можно ли что-то узнать без химической модели?

- Сам факт наличия молекулярного облака (пыль, CO)
- Плотность (CO, аммиак, метанол)
- Лучевая концентрация (пыль, CO)
- Магнитное поле (пыль, CO, OH, CN)
- Температура (пыль, аммиак, метанол, CO)
- Скорость

Межзвездные химические реакции. Уравнения химической кинетики, виды газофазных реакций в МЗС, инициаторы

Уравнения химической кинетики

$$\frac{d}{dt} n_i^g(\vec{r}, t) = \sum_j \sum_l K_{lj}^g n_l^g n_j^g - n_i^g \sum_j K_{ij}^g n_j^g + \sum_j K_j^e n_j^g - K_i^e n_i^g$$

K^g — коэффициент скорости двухчастичной реакции

K^e — коэффициент скорости реакции, вызванной внешним фактором

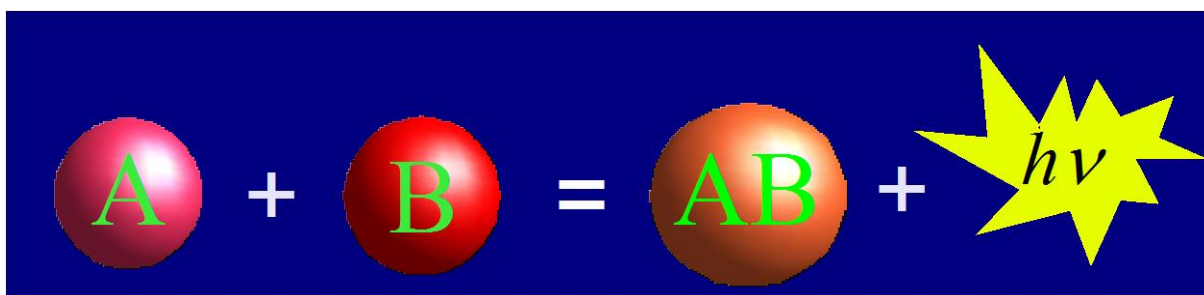
Газофазные реакции в МЗС

- Двухчастичные
 - Нейтраль-нейтральные
 - Ион-молекулярные
 - Диссоциативная рекомбинация
- Внешние факторы
 - Фотореакции
 - Реакции с космическими лучами

Нейтраль-нейтральные реакции

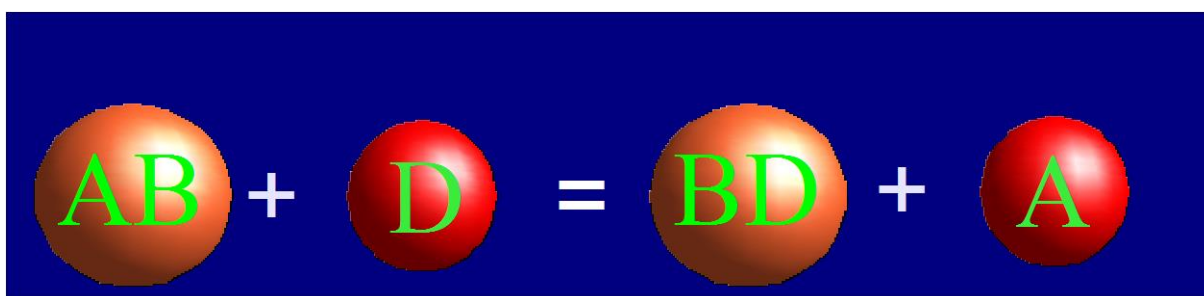
Радиативная ассоциация

Создание химических связей



Барьеры эндотермические, низкие скорости

Перераспределение химических связей



Относительно высокие скорости

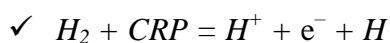
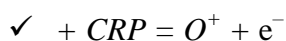
$$K_{ij} = a_{ij} (T/300 \text{ K})^{b_{ij}} \exp(-g_{ij} / T)$$

Фотореакции

$$K_i = a_i G_0 \exp(-g_i A_\nu)$$

G_0 — поле излучения, A_ν — ослабление поля излучения

Реакции с космическими лучами



Уравнения химической кинетики

$$\frac{d}{dt} n_i^g(r, t) = \sum_j \sum_l K_{lj}^g n_l^g n_j^g - n_i^g \sum_j K_{ij}^g n_j^g + \sum_{j \neq i} K_j^e n_j^g - K_i^e n_i^g$$

$$K^g = a (T/300 \text{ K})^b \exp(-g/T)$$

$$K^e = a G_0 \exp(-gA_V)$$

$$K^c = a z$$

✓ n, T, z, G_0, A_V — внешние параметры

✓ Набор компонентов

✓ a, b, g — параметры реакций

Трудности отождествления

- Огромное количество линий одной молекулы
- Большое количество молекул
- Изотопологи
- Атмосферное пропускание и ограничения наблюдений
- Ограниченное количество объектов
- Отсутствие лабораторных данных о спектрах

Проблема образования молекулярного водорода в МЗС. Роль пылинок в химических превращениях, протекающих в МЗС, моделирование этих процессов и возникающие при этом проблемы. Вероятностный подход к поверхностным реакциям

Образование молекулярного водорода на пыли

- ✓ Атомы водорода прилипают к пылинке.
- ✓ Перемещаясь по поверхности пылинки, атомы сталкиваются друг с другом и образуют молекулу H_2 .
- ✓ Энергия, выделившаяся при образовании молекулы H_2 , отрывает ее от пылинки

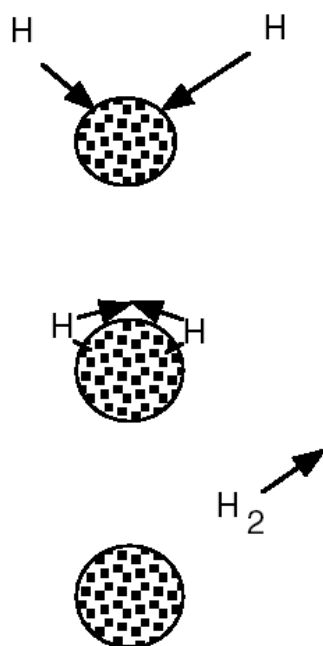


Рисунок 13.3. Образование молекулярного водорода

Дополнительные проблемы

- Вероятность прилипания
- Свойства поверхности
- Зависимость подвижности компонентов от состава мантии
- Распределение пылинок по размерам, столкновения пылинок (коагуляция и разрушение)

Вероятностный подход к поверхностным реакциям

Химическое управляющее уравнение:

$$\frac{\partial P(\vec{X}, t | \vec{X}_0, t_0)}{\partial t} = \sum_{j=1}^M [a_j(\vec{X} - \vec{\nu}_j)P(\vec{X} - \vec{\nu}_j, t | \vec{X}_0, t_0) - a_j(\vec{X})P(\vec{X}, t | \vec{X}_0, t_0)]$$

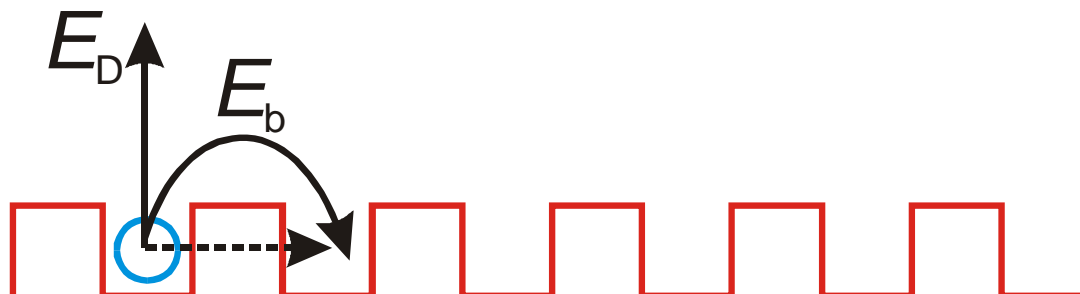


Рисунок 13.4. Схема подхода к поверхностным реакциям

Лекция 14

Астрохимические модели. Астрохимические базы данных

Что нужно для астрохимической модели

- Набор молекул и реакций между ними (база данных)
- Уравнения
- Начальный химический состав
- Физические параметры среды

Виды химических моделей

- Равновесные
- Псевдонравновесные (постоянные физические параметры)
- Неравновесные (предопределенная динамика)
- Химико-динамические (обратная связь)

Физическая модель

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) = -\operatorname{div} \left\{ \rho \vec{v} \left(\frac{v^2}{2} + \omega \right) \right\}$$

Уравнения для магнитного поля и излучения

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div} \rho_i \vec{v} = [P_i - L_i](j_v, T, \zeta, \rho_j, j = 1 \dots N)$$

Способы интегрирования

- Равновесные модели — система алгебраических уравнений
- Неравновесные модели — система дифференциальных уравнений (LSODE, VODE, VODEPK)

Неопределенности реакций. Ошибки в определении скоростей реакций. Проблемы с вычислением фотореакций

Неопределённости реакций

- Выбор БД и версии БД

- Вид выражения
- Неточности коэффициентов

Неточности коэффициентов скоростей

- UDFA — пять классов точности (A, B, C, D, E), соответствующих ошибкам в параметре α 25%, 50%, 2 раза, порядок величины, очень много
 - A — 1381 реакция (измеренные скорости)
 - B — 411 реакций (нейтраль-нейтральные и фотодиссоциация)
 - C — 3261 реакция (почти все ион-молекулярные реакции)
 - D — 1111 реакций (фотодиссоциация)
 - E — 8 реакций

Фотореакции

$$k_{\text{cont}} = \int \sigma_{ul}(\lambda) x_{IJ}(\lambda) d\lambda$$

$$k_{\text{line}} = \frac{\pi e^2}{mc^2} \lambda^2 f_{ul} \eta_u x_{IJ}(\lambda)$$

$$\frac{dI_v}{ds} = \varepsilon_v - \kappa_v I_v$$

$$I_v = I_v^0 \exp(-\tau_v)$$

$$d\tau_v = \kappa_v ds$$

Сложности моделирования реакций с изотопомерами. Отклонения от термодинамического равновесия. Скорость ионизации космическими лучами Реакции с изотопомерами

- Химия соединений дейтерия
- Химия изотопов углерода — диагностика!
- Другие изотопы (^{17}O , ^{15}N) — связь с Солнечной системой
- $^{12}\text{C} / ^{13}\text{C} \sim 60$ (локальная МЗС)
- $^{16}\text{O} / ^{18}\text{O} \sim 500$
- $^{16}\text{O} / ^{17}\text{O} \sim 2000$
- $\text{D} / \text{H} \sim 0.8\text{--}2.2 \cdot 10^{-5}$

Фракционирование

- ✓ $H_3^+ + HD \rightarrow H_2D^+ + H_2 + 230K$
- ✓ $H_2D^+ + HD \rightarrow D_2H^+ + H_2 + 180K$
- ✓ $D_2H^+ + HD \rightarrow D_3^+ + H_2 + 230K$
- ✓ $CO + H_2D^+ \rightarrow \frac{2}{3} HCO^+ + \frac{1}{3} DCO^+ + \frac{1}{3} H_2 + \frac{2}{3} HD$
- ✓ $CO + D_2H^+ \rightarrow \frac{1}{3} HCO^+ + \frac{2}{3} DCO^+ + \frac{1}{3} HD + \frac{2}{3} D_2$
- ✓ $N_2 + H_2D^+ \rightarrow \frac{2}{3} N_2H^+ + \frac{1}{3} N_2D^+ + \frac{1}{3} H_2 + \frac{2}{3} HD$
- ✓ $N_2 + D_2H^+ \rightarrow \frac{1}{3} N_2H^+ + \frac{2}{3} N_2D^+ + \frac{1}{3} HD + \frac{2}{3} D_2$

Отклонения от термодинамического равновесия

- Нетепловые (сверхтепловые) реакции
- Возбуждённые состояния

Скорость ионизации космическими лучами

- Внутри облаков и на окраине Солнечной системы — 10^{-17} c^{-1}
- В диффузных облаках — 10^{-15} c^{-1}
- Необходимо считать перенос космических лучей?

$$x_e = \sqrt{\frac{\zeta}{\beta n_H}}$$

Развитие представлений об образовании звезд. Разработка теории звездообразования. Структура молекулярных облаков. Разработка методов моделирования процессов звездообразования

Ключевой аспект

Чтобы образование звёзд могло происходить «сейчас», необходимо наличие исходного сырья, то есть, вещества, которое могло бы превращаться в звёзды, — закон сохранения массы!

Ещё один ключевой аспект

Звёзды не могут светить вечно. В них должен быть источник энергии, который однажды начал работать и однажды иссякнет — закон сохранения энергии!

Гравитационная неустойчивость (Джинса)

Однородная статичная среда

$$\rho = \rho_0 + \delta\rho \exp[i(kx - \omega t)]$$

$$\nabla(\rho u) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) = 0$$

$$P = \rho a_T^2$$

$$\nabla^2 \Phi_g = 4\pi G \rho$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P - \rho \nabla \Phi_g$$

$$-i\omega \delta\rho + ik\rho_0 \delta u = 0$$

$$\delta P = \delta\rho a_T^2$$

$$-k^2 \delta\Phi_g = 4\pi G \delta\rho$$

$$-i\omega\rho_0 \delta u = -ik\delta P - ik\rho_0 \delta\Phi_g$$

$$\omega^2 = k^2 a_T^2 - 4\pi G \rho_0 = a_T^2 (k^2 - k_J^2)$$

$$\frac{2\pi}{k_J} = \lambda_J = \sqrt{\frac{\pi a_T^2}{G \rho_0}}$$

$$M_J = \left(\sqrt{\frac{\pi a_T^2}{G \rho_0}}\right)^3 \rho_0 = \left(\frac{\pi k T}{\mu m_H G}\right)^{3/2} \rho_0^{-1/2}$$

Начало XX века

- Звёзды образуются непрерывно
- Источник энергии — гравитационное сжатие
- Механизм образования — гравитационная неустойчивость
- Исходный материал неясен, но, возможно, есть связь с туманностями, в частности, спиральными

Первая половина XX века

- Возраст Земли больше 4 млрд. лет
- Источник звёздной энергии — термоядерные реакции превращения водорода в гелий
- Где водород?

- Возвращение к гипотезе «катастрофизма»

Середина XX века

- Открытие ионизованного и атомарного водорода в МЗС
- Распад звёздных ассоциаций (Амбарцумян)
- Конечность времени жизни массивных звёзд

Два слагаемых звездообразования

- Звёзды должны образовываться сейчас
- Звёздам есть из чего образовываться сейчас
- Как это происходит и как проявляется?

Стадии коллапса

- *Дозвёздное ядро*: почти изотермическое, проявляется как источник субмиллиметрового излучения и молекулярных линий (CO, CS, аммиак)
- *Первое гидростатическое ядро*: от повышения непрозрачности до испарения пыли.
- *Главная фаза аккреции*, протозвезда проявляется как источник ИК-излучения
- **Протозвезду нужно наблюдать как инфракрасный источник**

Лекция 15

Магнитное поле как фактор, контролирующий динамику молекулярных облаков. "Стандартная" модель звездообразования. Химический возраст ядра, форма спектральных линий

Звёзды образуются слишком медленно!

$$M_J = \left(\frac{\pi k T}{\mu m_H G} \right)^{3/2} \rho_0^{-1/2} = 60 \left(\frac{T}{10\text{K}} \right)^{3/2} \left(\frac{n}{10^2 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

Масса молекулярных облаков существенно превышает джинсовскую!

«Стандартная» модель звездообразования

- Молекулярные облака гравитационно неустойчивы
- Скорость звездообразования в Галактике должна быть существенно выше наблюдаемой,

НО

- Скорость звездообразования в Галактике невелика
- Молекулярные облака — долгоживущие объекты
- Эффективность звездообразования не превышает нескольких процентов

ЗНАЧИТ

- Имеется фактор, удерживающий облака от сжатия — магнитное поле
- Поддержка магнитного поля медленно теряется и приводит к медленному образованию звёзд

Сегодня стандартная (магнитная) и гравитационно-турбулентная модель звездообразования конкурируют друг с другом. Первая лучше объясняет появление отдельных ядер, а вторая — их ансамблей. В целом наука движется к объединению этих двух парадигм, потому что, скорее всего, значение имеют и турбулентность, и гравитация, и магнитное поле, и действие всего этого в комплексе. Но все это вместе довольно сложно промоделировать, и, чтобы получить красивый и убедительный результат, нужны очень мощные программы и суперкомпьютеры.

Массивные дозвездные ядра. Времена жизни протозвездных объектов на разных стадиях. Гравитационно-турбулентная модель

Звёзды образуются слишком быстро!

Практически во всех известных комплексах молекулярных облаков идёт звездообразование.

В большинстве областей звездообразования с молекулярным газом возраст молодых звёзд не превышает 1–3 млн. лет.

Гравитурбулентная модель

- Молекулярные облака — короткоживущие объекты
- Звёзды образуются в местах схождения турбулентных течений
- Роль магнитного поля либо пренебрежимо мала, либо не является решающей.

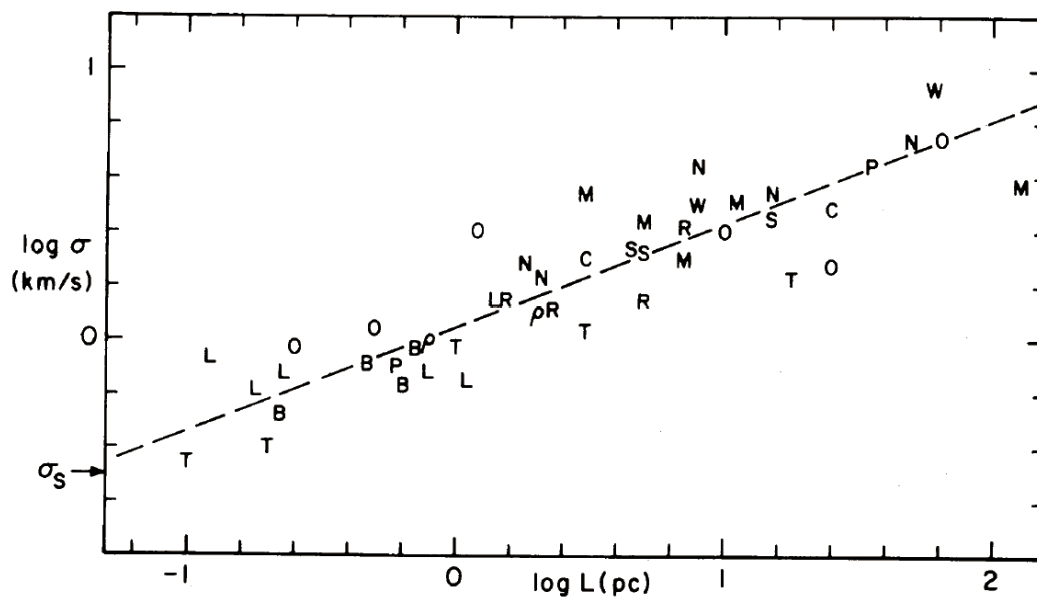


Рисунок 15.1. Гравитурбулентная модель

Сравнение "стандартной" и гравитурбулентной моделей. Базовый сценарий звездообразования

Достоинства и недостатки моделей

Магнитная (стандартная)

- Низкая эффективность звездообразования
- Профили плотности и скорости
- Химические возрасты
- Статистика
- Степень ионизации

Гравитурбулентная

- Единство модели

- Статистика
- Профили плотности
- Высокая эффективность звездообразования
- Профили скорости
- Химические возрасты
- Диссипация турбулентности

Гравотурбулентная модель звездообразования, согласно которой молекулярные облака образуются в результате столкновения турбулентных течений межзвездного газа. В том месте, где это произошло, образуется уплотнение. Молекулярное облако продолжает падать внутрь самого себя и дробится на отдельные фрагменты, которые становятся гравитационно неустойчивыми. В результате сжатие, которое начинается с целого молекулярного облака, постепенно переходит на маленькие масштабы и в отдельных ядрышках приводит к образованию звезд. Поэтому, в частности, звезды не образуются поодиночке, они обязательно всегда формируются группами.

Ещё одна проблема — образование массивных звёзд

Особенности Солнечной системы

Астероиды

Относительно небольшое небесное тело Солнечной системы, движущееся по орбите вокруг Солнца. Астероиды значительно уступают по массе и размерам планетам, имеют неправильную форму и не имеют атмосферы, хотя при этом и у них могут быть спутники.

В настоящий момент в Солнечной системе обнаружены сотни тысяч астероидов. По данным Minor Planet Center (MPC) на 1 апреля 2017 года, обнаружено 729 626 малых планет, причем в течение 2016 года было обнаружено 47 034 малых тел. По состоянию на 11 сентября 2017 г. в базе данных насчитывалось 739 062 объекта, из которых для 496 915 точно определены орбиты и им присвоен официальный номер, более 19 000 из них имели официально утверждённые наименования. Предполагается, что в Солнечной системе может находиться от 1,1 до 1,9 миллиона объектов, имеющих размеры более 1 км. Большинство известных на данный момент астероидов сосредоточено в пределах пояса астероидов, расположенного между орбитами Марса и Юпитера.

Самым крупным астероидом в Солнечной системе считалась Церера, имеющая размеры приблизительно 975×909 км, однако с 24 августа 2006 года она получила статус карликовой планеты. Два других крупнейших астероида Паллада и Веста имеют диаметр ~500 км. Веста является единственным объектом пояса астероидов, который

можно наблюдать невооружённым глазом. Астероиды, движущиеся по другим орбитам, также могут быть наблюдаемы невооружённым глазом в период прохождения вблизи Земли.

Общая масса всех астероидов главного пояса оценивается в $3,0\text{—}3,6 \cdot 10^{21}$ кг, что составляет всего около 4 % от массы Луны. Масса Цереры — $9,5 \cdot 10^{20}$ кг, то есть около 32 % от общей, а вместе с тремя крупнейшими астероидами (4) Веста (9 %), Паллада (7 %), (10) Гигея (3 %) — 51 %, то есть абсолютное большинство астероидов имеют ничтожную по астрономическим меркам массу.

- Полное число на 5 октября 2017 г.: известно 749683 (год назад 723367), пронумеровано 503850 (год назад 480806), присвоены имена 21109 (год назад 20364)
- Открывается примерно 3-4 астероида в час
- Полная масса Главного пояса — $3,6 \cdot 10^{24}$ г (0.0006 масс Земли, 0.05 массы Луны)
- Диапазон больших полуосей — 2–3.3 а.е.
- Эксцентриситеты < 0.35
- S-, M-, C-, V-типы

Транснептуновые объекты

- Классический пояс Койпера

Почти круговые орбиты между 40 и 50 а.е., но некоторые с большими наклонениями (до 30°)

- Рассеянный диск

Вытянутые орбиты с перигелием в области орбиты Нептуна и афелийными расстояниями в сотни а.е.

- Резонансные объекты (Плутино)

Резонансы с Нептуном

Кометы

Небольшое небесное тело, обращающееся вокруг Солнца по весьма вытянутой орбите в виде конического сечения. При приближении к Солнцу комета

образует кому и иногда хвост из газа и пыли. Представляет из себя тело, состоящее из спрессованного льда, камня и металла.

На середину 2018 года обнаружено 6339 комет, которые попадают во внутреннюю область Солнечной системы — область планет.

- Короткопериодические кометы (период менее 200 лет)
 - Семейство Юпитера (период до 20 лет)
 - Кометы галлеевского типа (семейства Сатурна, Урана, Нептуна)
- Долгопериодические кометы

Предположительно, долгопериодические кометы прилетают во внутреннюю Солнечную систему из облака Оорта, в котором находится огромное количество кометных ядер. Тела, находящиеся на окраинах Солнечной системы, как правило, состоят из летучих веществ (водяных, метановых и других газов), испаряющихся при подлёте к Солнцу.

На данный момент обнаружено более 400 короткопериодических комет. Из них около 200 наблюдалось в более чем одном прохождении перигелия. Многие из них входят в так называемые семейства. Например, большинство самых короткопериодических комет (их полный оборот вокруг Солнца длится 3—10 лет) образуют семейство Юпитера. Немного малочисленнее семейства Сатурна, Урана и Нептуна (к последнему, в частности, относится знаменитая комета Галлея)

Кометы, прибывающие из глубин космоса, выглядят как туманные объекты, за которыми тянется хвост, иногда достигающий в длину нескольких миллионов километров. Ядро кометы представляет собой тело из твёрдых частиц, окутанное туманной оболочкой, которая называется комой. Ядро диаметром в несколько километров может иметь вокруг себя кому в 80 тыс. км в поперечнике. Потoki солнечных лучей выбивают частицы газа из комы и отбрасывают их назад, вытягивая в длинный дымчатый хвост, который движется за ней в пространстве.

Яркость комет очень сильно зависит от их расстояния до Солнца. Из всех комет только очень малая часть приближается к Солнцу и Земле настолько, чтобы их можно было увидеть невооружённым глазом. Самые заметные из них иногда называют «большими (великими) кометами».

Многие из наблюдаемых нами метеоров («падающих звёзд») имеют кометное происхождение. Это потерянные кометой частицы, которые сгорают при попадании в атмосферу планет.

Лекция 16

Фотохимические процессы - основные понятия

Передача энергии для активации вступающих во взаимодействие молекул может осуществляться либо в форме теплового излучения (т. н. темновые реакции), либо в виде квантов электромагнитного излучения. Реакции, в которых активация частиц является результатом их взаимодействия с квантами электромагнитного излучения видимой области спектра, называют фотохимическими реакциями. При всех фотохимических процессах выполняется закон Гротгуса:

Химическое превращение вещества может вызвать только то излучение, которое поглощается этим веществом.

Излучение, отражённое веществом, а также прошедшее сквозь него, не вызывают никаких химических превращений. Иногда фотохимические процессы происходят под действием излучения, которое не поглощается реагирующими веществами; однако в таких случаях реакционная смесь должна содержать т.н. сенсibilизаторы. Механизм действия сенсibilизаторов заключается в том, что они поглощают свет, переходя в возбуждённое состояние, а затем при столкновении с молекулами реагентов передают им избыток своей энергии. Сенсibilизатором фотохимических реакций является, например, хлорофилл.

Между количеством лучистой энергии, поглощенной молекулами вещества, и количеством фотохимически прореагировавших молекул существует соотношение, выражаемое законом фотохимической эквивалентности Штарка – Эйнштейна:

Число молекул, подвергшихся первичному фотохимическому превращению, равно числу поглощенных веществом квантов электромагнитного излучения.

Поскольку фотохимическая реакция, как правило, включает в себя и т.н. вторичные процессы (например, в случае цепного механизма), для описания реакции вводится понятие квантовый выход фотохимической реакции:

Квантовый выход фотохимической реакции γ есть отношение числа частиц, претерпевших превращение, к числу поглощенных веществом квантов света.

Квантовый выход реакции может варьироваться в очень широких пределах: от 10⁻³ (фотохимическое разложение метилбромидом) до 10⁶ (цепная реакция водорода с хлором); в общем случае, чем более долгоживущей является активная частица, тем с большим квантовым выходом протекает фотохимическая реакция.

Круговорот вещества во Вселенной. Локальное термодинамическое равновесие

В разных областях межзвездного пространства плотность газа и пыли очень неравномерна. В некоторых же местах эти вещества скапливаются в более концентрированные структуры, образуя гигантские облака и сверхоблака.

Однако межзвездный газ – это не просто разреженное вещество, представленное атомным и молекулярным водородом, а материал, из которого формируются новые звезды. А происходит этот процесс следующим образом. Сначала в некоторых зонах газового облака в результате сил гравитации появляются плотные сгустки вещества – зародыши новых звезд.

Образовавшийся «комочек» продолжает сжиматься. И длится этот процесс до тех пор, пока в центре этого сгустка температура и плотность не поднимутся до той критической отметки, после которой начинаются термоядерные реакции, в ходе которых водород превращается в гелий. Как только эти процессы пойдут, сгусток газа становится звездой.

Кроме газа, активную роль в образовании звезд играет и межзвездная пыль. Именно благодаря ей газ быстрее остывает. Связано это, во-первых, с тем, что пыль поглощает выделяющуюся во время сжатия облака энергию; во-вторых, эту энергию она перераспределяет по другим диапазонам спектра, тем самым влияя на энергетический обмен между звездой и окружающим пространством. И от того, каковы свойства пыли, а также какое ее количество в протозвездном облаке, зависит, сколько звезд в нем появится, а также каковой будет их масса.

Когда в той или иной области молекулярного облака появились звезды, то они уже начинают оказывать существенное влияние на окружающий их газ. Это влияние проявляется в том, что начинают также уплотняться и соседние газовые облака, что приводит к формированию в них новых звезд.

То есть звездообразование в молекулярных облаках подобно цепной реакции: оно сначала «вспыхивает» в одной области облака, а затем постепенно охватывает другие его участки, а также примыкающие облака. В ходе этого процесса межзвездный газ превращается в звезды.

Спектры планетарных туманностей. Динамика возбужденных состояний

Большинство планетарной форма туманности в конце жизни звезды, и сравнительно кратковременное явление, длящееся, возможно, несколько десятков тысяч лет, по сравнению с типичной звездной жизнью, охватывающей несколько миллиардов лет. После того, как большая часть атмосферы красного гиганта рассеиваются, ультрафиолетовое излучение от горячего светящегося ядра, называется планетарная туманность ядро (ПННУ), ионизирует выброшенный материал. Поглощенный ультрафиолетовый свет затем заряжает оболочку туманного газа вокруг центральной звезды, заставляя его выглядеть как яркая планетарную туманность.

Планетарные туманности, вероятно, играют важную роль в химической эволюции Млечного Пути высылая элементы в межзвездную среду из звезд, где эти элементы были созданы. Планетарные туманности наблюдаются в более

отдаленных галактиках, что дает полезную информацию об их химических содержаниях.

Начиная с 1990 - х годов, космический телескоп Хаббла изображения показали, что многие планетарные туманности имеют чрезвычайно сложные и разнообразные морфологию. Около одной пятой примерно сферическими, но большинство из них не является сферически симметричной. Механизмы, которые производят такое большое разнообразие форм и функций, еще не до конца изучены, но бинарные центральные звезды, звездные ветра и магнитные поля могут играть определенную роль.

Природа планетарных туманностей оставалась неизвестной, пока первые спектроскопические наблюдения были сделаны в середине 19-го века. Использование призмы, чтобы рассеять их свет, Уильям Хиггинс был один из самых ранних астрономов с целью изучения оптических спектров астрономических объектов.

29 августа 1864 года, Хиггинс был первым, чтобы проанализировать спектр планетарной туманности, когда он наблюдал Туманность Кошачий глаз. Его наблюдения звезд показали, что их спектры состояли из континуума излучения с большим количеством темных линий наложенных друг на друга. Он обнаружил, что многие туманные объекты, такие как Туманность Андромеды (как это было тогда известно) имели спектры, которые были очень похожи. Однако, когда Хиггинс смотрел на глаз Туманность Кошачий, он нашел совершенно другой спектр. Вместо того, чтобы сильный континуум с линиями поглощения накладывається, Кошачий глаз Туманность и другие подобные объекты показали ряд эмиссионных линий. Brightest из них был на длине волны 500,7 нм, которые не соответствуют с линией любого известного элемента.

Во - первых, была выдвинута гипотеза о том, что линия может быть из-за неизвестного элемента, который был назван небулия. Подобная идея привела к открытию гелия путем анализа солнечного спектра «s в 1868. В то время как гелий был выделен на Земле вскоре после его открытия в спектре Солнца, небулия не было. В начале 20го века, Генри Норрис Рассел предположил, что, вместо того, чтобы новый элемент, линия на 500,7 нм обусловлена знакомым элемент в незнакомых условиях.

Физики показали в 1920 - х годах, что в газе при экстремально низких плотностях, электроны могут занимать возбужденные метастабильные уровни энергии атомов и ионов, которые могли бы быть де-возбуждаемые столкновений, которые имели бы место при более высоких плотностях. Электронные переходы от этих уровней в азот и кислорода приводят к линии излучения 500,7 нм и другие. Эти спектральные линии, которые можно увидеть только в газах очень низкой плотности, называются запрещенные линии. Таким образом, спектроскопические наблюдения показали, что туманности были сделаны из чрезвычайно разреженного газа.

Bowen механизм как пример резонансной флуоресценции. Изотопическое фракционирование

В большинстве случаев, излучаемый свет имеет большую длину волны, и, следовательно, меньшую энергию, чем поглощаемого излучения; Это явление известно, как сдвиг Стокса. Однако, когда поглощенная электромагнитное излучение интенсивно, это возможно для одного электрона, чтобы поглотить два фотона; это двухфотонное поглощение может привести к выбросу излучения, имеющего более короткую длину волны, чем поглощаемого излучения. Испускаемое излучение также может быть одной и той же длиной волны, что и поглощаемого излучения, называется «резонансная флуоресценция».

Молекулы, которые возбуждаются посредством поглощения света или с помощью другого процесса (например, в качестве продукта реакции) может передавать энергию на вторую «сенсibilizированную» молекулу, которую превращают в ее возбужденное состояние, а затем может флуоресцировать.

Лекция 17

Особенности термодинамических и квантовохимических методов в астрохимии

Методы квантовой химии:

- *Метод Хартри-Фока*
- *Атомные базисные наборы*
- *Теория функционала плотности*
- *Теория возмущений*
- *Метод конфигурационного взаимодействия*
- *Метод связанных кластеров*
- *Квантово-химические программы расчета*

Метод Хартри — Фока — в квантовой механике приближённый метод решения уравнения Шрёдингера путём сведения многочастичной задачи к одночастичной в предположении, что каждая частица двигается в некотором усреднённом самосогласованном поле, создаваемом всеми остальными частицами системы. Решение уравнения Шрёдингера позволяет получить целый ряд сведений о свойствах системы, в том числе и её электронную структуру.

Метод был впервые предложен английским физиком Дугласом Хартри в 1927 году, однако содержал существенные недостатки и был впоследствии улучшен советским физиком В. А. Фоком. В отличие от Хартри, использовавшего метод самосогласованного поля с пробной волновой функцией в виде произведения одноэлектронных функций, В. А. Фок предложил в качестве пробной функции брать слэтеровский детерминант, что позволило автоматически учитывать антисимметрию полной волновой функции квантовомеханической системы по электронным переменным.

Метод широко используется в квантовой химии, в частности, для проведения численного моделирования конфигурации некоторых молекул, в теории атома для расчётов свойств атомных конфигураций.

Метод Хартри — Фока также применяется для исследования физических свойств смешанных кристаллов (например, для построения моделей распределения ионов замещения по узлам кристаллической решётки и расчета тензоров градиента электрических полей).

Метод состоит из нескольких стадий. На первом этапе решается задача о движении электрона в определённом модельном потенциале, который должен как можно лучше

отображать взаимодействие выбранного электрона с ядрами атомов и другими электронами. Найденные волновые функции используются для того, чтобы определить взаимодействие электрона с другими электронами и ядрами, уточняя потенциал. В дальнейшем опять решается задача нахождения волновых функций электрона для нового потенциала и нахождения из него следующего, более точного. Процедура продолжается до достижения сходимости.

Атомный базисный набор — набор функций, который используется для построения молекулярных орбиталей, которые представляются как линейная комбинация функций этого набора с определёнными весами или коэффициентами. Обычно этими функциями являются атомные орбитали, центрированные на атомах, хотя иногда функции центрируют на связях, на половинах р-орбитали и т. п.

Теория функционала плотности — метод расчёта электронной структуры систем многих частиц в квантовой физике и квантовой химии. В частности, применяется для расчёта электронной структуры молекул и конденсированного вещества. Является одним из наиболее широко используемых и универсальных методов в вычислительной физике и вычислительной химии. Твёрдое тело рассматривается как система, состоящая из большого числа одинаково взаимодействующих между собой электронов, удерживаемых вместе решёткой из атомных ядер. Основная идея метода заключается в использовании понятия электронной плотности в основном состоянии, её распределение описывается одночастичным уравнением Шрёдингера.

Теория возмущений — метод приближенного решения задач теоретической физики, применимый в том случае, когда в задаче присутствует малый параметр, причём в пренебрежении этим параметром задача имеет точное решение.

Физические величины, рассчитанные по теории возмущений, имеют вид ряда

Метод конфигурационного взаимодействия.

Данный метод является наиболее прямым воплощением идеи о многодетерминантном представлении пробной волновой функции. Полную волновую функцию записывают в виде линейной комбинации слэтеровских определителей, отвечающих различным электронным конфигурациям.

$$\Psi = \sum_{k=0}^M A_k \Psi_k,$$

где M — число учитываемых конфигураций. Этот метод получил название метода конфигурационного взаимодействия (КВ) или, используя широко распространенную английскую аббревиатуру, configuration interaction (CI). Детерминанты Слэтера Ψ_k определяются как различные способы размещения электронов по всем орбиталям. Конфигурация Ψ_0 соответствует основному состоянию,

а остальные – возбужденным состояниям. Не все из них являются истинными возбужденными состояниями, однако это несущественно для дальнейших расчетов.

В теории связанных кластеров волновая функция так же, представляется линейной комбинацией детерминантов, построенных из исходного слэтеровского детерминанта волновой функции основного состояния метода Хартри — Фока. Однако она выбирается в ином виде.

Эффект туннелирования в астрохимии. Методы построения поверхностей потенциальной энергии

Туннельный эффект, туннелирование — преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия (остающаяся при туннелировании неизменной) меньше высоты барьера. Туннельный эффект — явление исключительно квантовой природы, невозможное в классической механике и даже полностью противоречащее ей. Аналогом туннельного эффекта в волновой оптике может служить проникновение световой волны внутрь отражающей среды (на расстояния порядка длины световой волны) в условиях, когда, с точки зрения геометрической оптики, происходит полное внутреннее отражение. Явление туннелирования лежит в основе многих важных процессов в атомной и молекулярной физике, в физике атомного ядра, твёрдого тела и т. д.

Методы ПППЭ:

- *Метод самосогласованного поля*
- *Атомные базисные наборы*
- *Теория функционала плотности*
- *Теория возмущения*
- *Метод конфигурационного взаимодействия*
- *Метод связанных кластеров*
- *Квантово-химические программы расчета*

Механизмы инициирования реакций. Катализ на поверхности

Методы инициирования реакций:

- *Тепловые столкновения с тяжелыми нейтральными частицами (атомы, молекулы), ударные волны.*
- *Столкновения с электронами, протонами, ионами и другими заряженными частицами*

- Рекомбинация ионов с электронами
- Воздействие излучения
- Гетерогенный катализ на поверхности пылинок

Лекция 18

Формирование Солнечной системы. Планеты Солнечной системы. Классы астероидов. Вода в Солнечной системе. Кометы

Гипотезы о происхождении Солнечной системы

- *Бюффон (1749): комета, приливная гипотеза*
- *Кант (1755), Лаплас (1796): единообразие движений в Солнечной системе — единый физический процесс; небулярная гипотеза*
- *Чемберлин, Молтон (1905): планетезимали — инфинитезимальные планеты, приливная гипотеза*
- *Джинс (1917): приливная гипотеза*

Идею Чемберлина — Мультиона о приливном образовании планетной системы использовал Дж. Джинс, построив в 1916 г. новую приливную гипотезу в сотрудничестве с английским астрономом и геофизиком Х. Джеффрисом. Гипотеза эта была особенно популярна в 20—30-е гг. В отличие от Чемберлина и Мультиона Джинс вновь вернулся к идее исходного горячего (расплавленного) состояния планет. По его расчетам, такие планеты могли образоваться непосредственно из еще не остывшего вещества, вырванной из Солнца струи. Его результаты, благодаря огромному авторитету Джинса, были восприняты с большим доверием и долгое время практически не подвергались сомнению (до конца 30-х гг.). В этой гипотезе, как казалось, снимались все главные трудности прежней планетной космогонии: проблема момента, необходимость огненно-жидкой стадии планет (что долгое время неправомерно понималось как необходимость такого состояния всей планеты целиком в самом начале ее существования), наконец, сама возможность формирования планет из горячей газовой струи под действием сил гравитации, как казалось, доказанная Джинсом.

Небулярная гипотеза. Наиболее широко принимаемая научной общественностью космогоническая теория, объясняющая формирование и эволюцию Солнечной системы. Теория предполагает, что Солнечная система сформировалась из туманности. Изначально применимая лишь к Солнечной системе, эта гипотеза формирования планетарных систем считается в общих чертах применимой ко всей остальной Вселенной. Широкое признание получил современный вариант Небулярной гипотезы — Небулярно-дискковая Солнечная модель, или проще: Солнечная небулярная модель. Небулярная гипотеза даёт объяснение целому ряду свойств Солнечной системы, включая близкие к круговым и расположенные в одной плоскости орбиты, и вращение планет в направлении вращения Солнца вокруг своей оси. Множество элементов Небулярной гипотезы нашли отражение в современных теориях формирования планет, но большая их часть претерпела изменения.

Согласно Небулярной гипотезе, звезды формируются в массивных и плотных облаках молекулярного водорода — молекулярных облаках. Эти облака гравитационно неустойчивы, и материя в них собирается в сгустки, вращается, сжимается и затем формирует звезды. Формирование звезды — комплексный и длительный процесс, который всегда создаёт вокруг молодой звезды газообразный протопланетный диск. Этот процесс нередко приводит к появлению планет, при недостаточно хорошо известных обстоятельствах. Таким образом, формирование планетной системы — естественный результат формирования звёзд. Солнцеподобные звезды формируются на протяжении примерно миллиона лет, а протопланетный диск формируется на протяжении последующих 10—100 миллионов лет.

Протопланетный диск представляет собой аккреционный диск, подпитывающий центральную звезду. Изначально очень горячий, диск постепенно остывает до стадии, близкой по типу к звёздным системам типа Т Тельца; затем формирование пылевых песчинок приводит к появлению каменных и ледяных глыб. Сталкиваясь и слипаясь, глыбы формируют многокилометровые планетезимали. Если диск достаточно массивен, скоротечная аккреция вокруг планетезималей приводит к формированию в течение 100—300 тысяч лет протопланет размерами с Луну или Марс. Вблизи от звезды планетарные эмбрионы, пройдя через стадию слияний и поглощений, формируют несколько планет Земной группы. Последняя стадия занимает от 100 миллионов до миллиарда лет.

Формирование планет-гигантов — более сложный процесс. Считается, что они формируются за так называемой снеговой линией, где планетарные эмбрионы в основном состоят из различных типов льдов. В результате они в несколько раз более массивны, чем внутренняя часть протопланетного диска. Что следует после формирования протопланеты — не до конца ясно. Немалая часть таких протопланет продолжает расти, достигая 5-10 земных масс — порогового значения, позволяющего начать аккрецию водород-гелиевого газа из диска. Накопление газа ядром — изначально медленный процесс, который длится миллионы лет, но по достижении массы в 30 земных он начинает резко ускоряться. Планеты наподобие Юпитера и Сатурна, как считается, накапливали свою массу в течение всего 10 тысяч лет. Аккреция останавливается с исчерпанием запасов газа. Образовавшиеся планеты могут мигрировать на большие расстояния в процессе или после формирования. Ледяные гиганты наподобие Урана и Нептуна считаются неудавшимися ядрами протопланет, которые сформировались в момент почти полного исчерпания диска

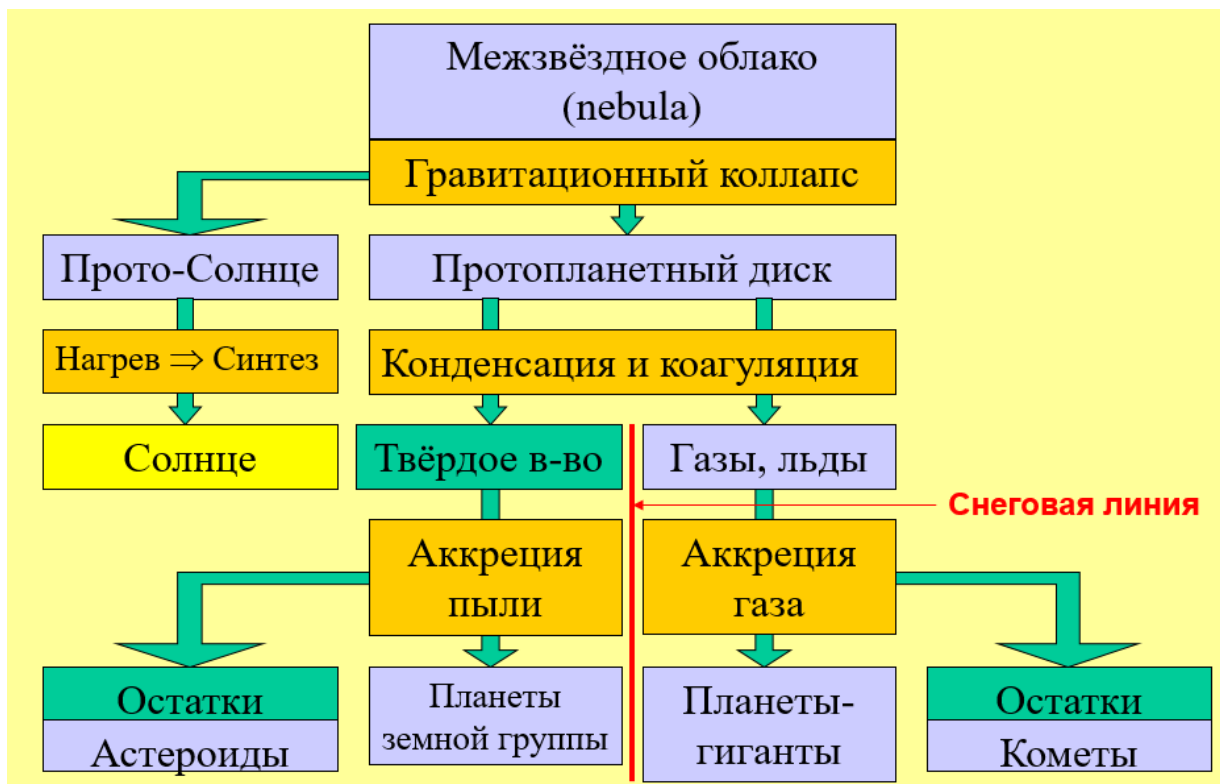


Рисунок 18.1. Небулярная гипотеза

Классификация SMASS

Этот относительно новый метод классификации был предложен Шелте Басом и Richard P. Binzel в 2002 году на основе результатов проекта «Спектрального изучения малых астероидов главного пояса астероидов» (SMASS), по итогам изучения 1447 астероидов. Это исследование спектров проводилось с гораздо более высоким разрешением, чем ECAS, что позволило проанализировать спектры поверхностей астероидов на более узких длинах волн, выявив, тем самым, много новых особенностей в спектре. Тем не менее, исследования проводились в небольшом диапазоне длин волн (от 0,44 мкм до 0,92 мкм) и при этом не учитывалось альbedo астероидов. Новая классификация разрабатывалась так, чтобы максимально сохранить связь таксономией Толена, в результате с учётом разницы полученных данных, астероиды были разделены на 24 класса. В итоге большинство астероидов были распределены по трём большим классам (C, S и X), а остальные попали в более мелкие классы:

Группа углеродных астероидов (C-группа) — углеродные объекты, включает в себя следующие классы:

- *Класс В соответствует в классификации Толена классам В и F*

Основным классом являются астероиды класса C, имеющие наиболее типичные спектры для данной группы

- Астероиды класса Cg, Ch и Cgh соответствуют в классификации Толена классу G
- К классу Ch относятся астероиды с поглощением на длине волны 0,7 мкм
- К классу Cb относятся астероиды, соответствующие переходу между объектами, относящимися к C и B классу в классификации SMASS.

Группа кремниевых астероидов (S-группа) — силикатные (каменные) астероиды, включает в себя следующие классы:

- Класс A
- Класс K ((181) Эвхариды, (221) Эос)
- Класс L ((83) Беатрис)
- Класс Q
- Класс R

Основным классом являются астероиды класса S, имеющие наиболее типичные спектры для S-группы

Sa, Sk, Sl, Sq и Sg классы, в которые входят объекты, занимающие промежуточное положение между классом S и классами A, K, L, Q и R, соответственно.

Группа железных астероидов (X-группа) — астероиды с высоким содержанием металлов, включает в себя следующие классы:

Основным классом являются астероиды класса X, имеющие наиболее типичные спектры для данной группы

- Астероиды класса Xe содержат в спектре умеренно широкую полосу поглощения на длине волны 0,49 мкм. Было высказано предположение, что это указывает на наличие пирротина (FeS). Этот класс примерно соответствует классу E в классификации Толена.
- Астероиды класса Xc и Xk содержат в спектре довольно широкий максимум на длинах волн 0,55 — 0,8 мкм, что вызвано большим отражением на этих длинах волн. Эти спектры занимают промежуточное положение между спектрами классов X, C и K.

Кроме как в классе Хе, ни существует больше соответствия между классами SMASS и классам М, Е, Р в классификации Толена. Все остальные классы в группе металлических астероидов классификации SMASS занимают промежуточное положение между классами М, Е, Р.

- *Класс D*
- *Класс J*
- *Класс Ld: новый подкласс астероидов, с более специфическими спектральными характеристиками, чем у класса Класс L*
- *Класс O ((3628) Божнемцова)*
- *Класс T*
- *Класс V*

Некоторые объекты в околоземном пространстве имеют спектры, которые сильно отличаются от любого из классов SMASS. Это, вероятно, потому, эти тела гораздо меньше, чем те, которые обнаружены в главном поясе астероидов, а их поверхность может быть моложе и менее изменена различными процессами или состоит из более простых минералов.

Гипотезы о формировании Солнечной системы. Протопланетные диски

Протопланетный диск или проплид — вращающийся околозвёздный диск плотного газа вокруг молодой, недавно сформированной звезды, протозвезды, звёзды типа Т Тельца или звёзды Хербига (Ае/Ве), из которого впоследствии образуются планеты. Протопланетный диск также может считаться аккреционным диском, поскольку составляющий его газообразный материал со внутреннего радиуса может падать на поверхность звезды.

Протопланетные диски были обнаружены вокруг нескольких молодых звёзд нашей Галактики. Наблюдения орбитального телескопа «Хаббл» выявили формирующиеся планетные системы в Туманности Ориона. Астрономы открыли огромные диски из газопылевой материи, похожие на протопланетные, вокруг звёзд Вега, Фомальгаут и Гемма (или Альфекка, α Северной Coronы).

Протозвезда, как правило, формируется из облака молекулярного газа, преимущественно состоящего из молекул водорода. Распределение вещества в таких облаках не бывает равномерным — некоторые области всегда будут иметь несколько большую плотность, чем другие. Такие области начинают стягиваться друг к другу, и когда сжатая область молекулярного облака достигает критического размера, массы

или плотности, начинается её гравитационный коллапс. По мере уплотнения коллапсирующего облака, случайные движения вещества, изначально присутствовавшие в этом облаке, меняют направление в соответствии с чистым угловым моментом формирующейся звезды, и в силу сохранения момента импульса, увеличивается угловая скорость всей туманности. Увеличение скорости приводит к тому, что вещество, оставшееся по периферии от образующейся звезды, из-за действующей на него центробежной силы распределяется в экваториальной плоскости — облако становится «сплюснутым». Коллапс образующейся звезды занимает около 100 тыс. лет, после чего температура её поверхности достигает такого же значения как у звезды с главной последовательности аналогичной массы, и молодое светило становится видимым. Так образуется звезда типа Т Тельца. Аккреция газа на звезду продолжается около 10 миллионов лет, перед тем как диск исчезнет, а далее он может быть снесён солнечным ветром молодой звезды или же он может просто перестать излучать. Старейший протопланетный диск из обнаруженных имеет возраст в 25 млн лет.

Солнечная туманность минимальной массы. Гравитационная неустойчивость. Внесолнечные планеты. Миграция планет

Мы можем использовать наблюдаемые значения масс и состав планет Солнечной системы для нахождения *нижнего предела* на то количество газа, которое должно было присутствовать на стадии формирования планет. Этот предел называется "минимальной массой протосолнечной туманности" (Weidenschilling, 1977). Процедура такова:

- Начнем с подсчета массы всех тяжелых элементов (далее называемых просто "железо"), входящих в состав каждой планеты, и дополним эту массу таким количеством водорода и гелия, чтобы в результате получилась смесь солнечного состава. Для Юпитера такое дополнение будет умеренным, а для Земли – весьма значительным.
 - *Потом разделим Солнечную систему на кольца так, чтобы в каждом кольце была одна планета. Распределим увеличенную (с учетом водорода и гелия) массу каждой планеты равномерно вдоль кольца, и придем к характерной поверхностной плотности газа Σ (единица измерения – $г/см^2$) в области, соответствующей каждой планете.*

Как оказалось, (если проигнорировать пояс астероидов), между Венерой и Нептуном эта плотность оказывается пропорциональной $\Sigma \sim r^{-3/2}$

Гравитационная неустойчивость (неустойчивость Джинса) — нарастание со временем пространственных флуктуаций скорости и плотности вещества под действием сил тяготения (гравитационных возмущений).

Гравитационная неустойчивость ведёт к образованию неоднородностей (сгустков) в первоначально однородной среде и сопровождается уменьшением гравитационной энергии системы, переходящей в кинетическую энергию сжимающегося вещества, которая, в свою очередь, может переходить в тепловую энергию и излучение.

Гравитационная неустойчивость играет главную роль в ряде фундаментальных физических процессов во Вселенной: от физики аккреционных дисков, процессов звездообразования, зарождения планетных систем, галактик и их скоплений до формирования крупномасштабной структуры Вселенной.

Внесолнечная планета, это планета, находящаяся вне Солнечной системы. Долгое время задача обнаружения планет возле других звёзд оставалась неразрешённой, так как планеты чрезвычайно малы и тусклы по сравнению со звёздами, а сами звёзды находятся далеко от Солнца (ближайшая — на расстоянии 4,24 световых года). Первые экзопланеты были обнаружены в конце 1980-х годов.

Сейчас такие планеты стали открывать благодаря усовершенствованным научным методам, зачастую на пределе их возможностей. По состоянию на 6 мая 2020 года достоверно подтверждено существование 4264 экзопланет в 3152 планетных системах, из которых в 697 имеется более одной планеты. Следует отметить, что количество надёжных кандидатов в экзопланеты значительно больше. Так, по проекту «Кеплер» на январь 2020 года числилось ещё 2420 кандидатов, а по проекту «TESS» на январь 2020 года - 1082 кандидата, однако, для получения ими статуса подтверждённых планет требуется их повторная регистрация с помощью наземных телескопов.

Общее количество экзопланет в галактике Млечный Путь оценивается не менее чем в 100 миллиардов, из которых от 5 до 20 миллиардов, возможно, являются «землеподобными». Также, согласно текущим оценкам, около 34 % солнцеподобных звёзд имеют в обитаемой зоне планеты, сравнимые с Землёй. Общее количество планет вне Солнечной системы, напоминающих Землю и обнаруженных по состоянию на август 2016 года, составляет 216.

Подавляющее большинство открытых экзопланет обнаружено с использованием различных непрямых методик детектирования, а не визуального наблюдения. Большинство известных экзопланет — газовые гиганты и более похожи на Юпитер, чем на Землю. Очевидно, это объясняется ограниченностью методов обнаружения (легче обнаружить короткопериодичные массивные планеты).

Миграция планет — процесс, происходящий при взаимодействии планеты или иного спутника звезды с газовым диском или планетезималиями, вследствие чего меняются параметры орбиты, в особенности большая полуось. Миграцией планет можно объяснить существование горячих юпитеров: экзопланет с массой порядка массы Юпитера, но с периодами обращения вокруг звезды, равными всего нескольким суткам. Распространённая теория формирования планет из протопланетного диска предсказывает, что подобные планеты не могут образовываться так близко к звёздам, поскольку на таких малых расстояниях недостаточно вещества, а температура слишком высока для возможности формирования каменных или ледяных планетезималей.

Также оказалось, что планеты земной массы могут подвергаться быстрой миграции во внутреннюю часть системы, если они формируются ещё в период существования газового диска. Это может влиять на образование ядер планет-гигантов (с массой порядка 10 масс Земли) в том случае, если они образуются путём аккреции на первоначальное ядро.

Типы миграции:

Миграция в диске

Данный тип орбитальной миграции возникает вследствие силы гравитации между массивным телом в диске и газом диска. Газ воздействует с равной силой на массивный объект. При этом меняется угловой момент на орбите планеты, что приводит к изменению элементов орбиты, таких как большая полуось (но могут меняться все элементы). Увеличение большой полуоси с течением времени может приводить к миграции планеты во внешнюю область системы, уменьшение — к миграции во внутреннюю область.

Миграция I типа

Малые планеты участвуют в миграции I типа, управляемой моментами, возникающими от возникающих волн в областях резонансов Линдблада и области коротации. Резонанс Линдблада приводит к образованию волн плотности в окружающем газе внутри и вне орбиты планеты. В большинстве случаев внешняя спиральная волна оказывает большее воздействие, чем внутренняя волна, поэтому планета теряет угловой момент и приближается к звезде. Темп миграции пропорционален массе планеты и локальной плотности газа. Характерное время миграции мало по сравнению со временем жизни газового диска (миллионы лет).

Дополнительное влияние от областей коротации возникает при воздействии газа, движущегося с периодом порядка орбитального периода планеты. В системе отсчёта, связанной с планетой, газ обращается по подковообразной орбите, меняя направление при приближении к планете спереди или сзади. Газ, меняющий

направление движение спереди планеты, обладает большим значением большой полуоси и может быть более холодным и плотным, чем меняющийся направление позади планеты. При этом может возникать область повышенной плотности газа впереди планеты и область пониженной плотности сзади планеты, при этом угловой момент меняется.

Масса планеты, при которой миграция проходит по типу I, зависит от местного вертикального масштаба для давления и в меньшей степени, от кинематической вязкости газа.

В случае тёплого и вязкого диска миграция I типа может проходить для планет больших масс. В локально изотермических дисках и в случаях слабых градиентов плотности и температуры воздействие областей коротации менее мощное, чем воздействие резонансов Линдблада.

Области миграции во внешнюю часть диска могут существовать в некотором диапазоне масс планет и параметров диска также в случае локально-изотермических или неизотермических дисков.

Расположение таких областей может меняться в зависимости от эволюционной стадии диска. В случае локально-изотермического диска они заключены в областях, где велики радиальные градиенты плотности и/или давления на расстояниях порядка нескольких вертикальных масштабов изменения давления. Миграция I типа в локально изотермическом диске согласуется с формированием и длительной эволюцией некоторых наблюдаемых телескопом Kepler экзопланет. Быстрая аккреция твёрдого вещества на планету также может создать дополнительный момент, при котором общий угловой момент планеты повышается.

Миграция II типа

Если планета достаточно массивна для того, чтобы создать пустоту в газовом диске, то её движение относят к миграции II типа. В случае достаточно большой массы возмущающей планеты приливное воздействие, оказываемое ей на газ, переносит угловой момент газу вне орбиты планеты, а внутри орбиты планеты угловой момент снижается, вследствие чего газ выметается из окрестностей орбиты планеты. При миграции I типа влияние вязкости газа препятствует выметанию газа вследствие его перераспределения и сглаживания резкого градиента плотности. Но если воздействие становится настолько сильным, что превышает влияние вязкости в окрестности планеты, то образуется кольцевая область пониженной плотности. Ширина кольца зависит от температуры и вязкости газа и от массы планет. В простом сценарии, когда газ не пересекает область кольца, миграция планет зависит от изменения вязкости диска с течением времени. Во внутренней части диска планета движется по спирали к звезде, совместно с аккрецией вещества на звезду. В таком случае миграция обычно

проходит медленнее, чем при типе I. Во внешней части диска миграция может проходить по направлению от звезды, если диск расширяется. Планета с массой Юпитера в обычном протопланетном диске, предположительно, совершает миграцию II типа, переход от I ко II типу происходит при массе порядка массы Сатурна.

Миграцией II типа можно объяснить существование горячих юпитеров.

В более реалистичных ситуациях, до тех пор, пока условия температуры и вязкости диска не достигнут экстремальных значений, существует поток газа сквозь кольцеобразную область.

Как следствие потока массы, возникают моменты сил, действующие на планету и зависящие от локальных свойств диска, также, как и моменты в случае миграции I типа. В вязких дисках миграцию II типа можно описать как изменённый вариант миграции II типа в рамках общей теории.

Переход от режима миграции I типа к режиму II типа обычно довольно плавный, однако были обнаружены случаи отклонений от плавного перехода.

В некоторых ситуациях, когда планеты создают некруговые возмущения в окружающем газовом диске, миграция II типа может замедлиться, остановиться или изменить направление.

Миграция III типа

Данный режим миграции существует в предельных случаях соотношений параметров диска и планет и характеризуется очень короткой временной шкалой.

Хотя в некоторых случаях этот режим миграции называют "убеганием", скорость миграции не обязательно растёт со временем.

Миграция III типа управляется коорбитальными моментами газа, захваченного в области либрации планеты при первоначальном относительно быстром радиальном движении планеты. Радиальное движение планеты смещает газ в направлении орбиты, создавая асимметрию плотности газа вблизи лидирующего и отстающего полушарий планеты.

Миграция III типа встречается в достаточно массивных дисках и в случае планет, способных создать только частичные пустоты в газовом диске.

В ранних интерпретациях миграция III типа связывалась с потоками газа поперёк орбиты планеты в противоположном направлении относительно радиального движения планеты.

Быстрое движение во внешнюю область иногда может происходить в течение короткого времени, при этом планеты-гиганты переводятся на далёкие орбиты, в том случае, если миграция II типа неэффективно переводит планеты обратно.

Лекция 19

Факторы Франка-Кондона. Вероятности спектральных переходов. Информативность спектров в астрохимии

Принцип Франка — Кондона — принцип в спектроскопии и квантовой химии, согласно которому безызлучательный перенос электрона может состояться только в том случае, когда его энергия в начальном и конечном состоянии равны. Существует несколько дополнительных формулировок этого принципа:

- *Электроны не обмениваются энергией с ядрами.*
- *Электроны движутся гораздо быстрее, чем ядра.*
- *Электроны всегда имеют равновесную конфигурацию при любом расположении ядер.*

Вероятность перехода и правила отбора. Анализ спектров показывает, что не все мыслимые переходы между соответствующими уровнями осуществляются, значительная часть переходов как бы запрещена. Кроме того, линии в спектрах имеют разную интенсивность, т. е. одни переходы более вероятны, чем другие. Объяснение этим двум фактам смогла дать только квантовомеханическая теория. Согласно этой теории, интенсивность перехода между двумя квантовыми уровнями пропорциональна квадрату значения некоторых векторных величин, называемых моментами перехода

Задачи квантовой астрохимии.

Задачи:

- *Диагностика астрономических объектов*
- *Спектральные свойства экзопланет*
- *Анализ чувствительности молекулярных спектров к вариации фундаментальных констант*
- *Термохимия*
- *Фотохимия*
- *Гетерогенный катализ*

Лекция 20

Сценарий образования Солнечной системы: место рождения, протосолнечная туманность

Место рождения Солнечной системы

- Резкий край
- Небольшой радиус
- Седноиды

Роль сверхновой

- Обогащение (загрязнение) досолнечной туманности или диска радиоактивными изотопами (^{26}Al)
 - Обогащение происходило локально
- Стимулирование образования протосолнечной туманности?

Поскольку туманность охлаждалась и сжималась, она сплющивалась и вращалась быстрее, сбрасывая (или теряя) газообразные кольца материи, после чего планеты формировались из материи таких колец.

Метеориты как остатки первого вещества во Вселенной. Виды метеоритов, их состав

Метеориты — «межпланетные зонды для бедных»

Метеорит — тело космического происхождения, достигшее поверхности Земли, или другого крупного небесного тела.

Большинство найденных метеоритов имеют массу от нескольких граммов до нескольких десятков тонн (крупнейший из найденных метеоритов — Гоба, масса которого, по подсчетам, составляла около 60 тонн). Полагают, что в сутки на Землю падает 5—6 тонн метеоритов, или 2 тысячи тонн в год

Наиболее часто встречаются каменные метеориты (92,8 % падений). Они состоят в основном из силикатов: оливинов ($\text{Fe, Mg}_2[\text{SiO}_4]$ (от фаялита $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ до форстерита $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$) и пироксенов ($\text{Fe, Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ (от ферросилита $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ до энстатита $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$).

Подавляющее большинство каменных метеоритов (92,3 % каменных, 85,7 % общего числа падений) — хондриты. Хондритами они называются, поскольку содержат хондры — сферические или эллиптические образования преимущественно силикатного состава. Большинство хондр имеет размер не более 1 мм в диаметре, но некоторые могут достигать и нескольких миллиметров. Хондры находятся в обломочной или мелкокристаллической матрице, причём нередко матрица отличается

от хондр не столько по составу, сколько по кристаллическому строению. Состав хондритов практически полностью повторяет химический состав Солнца, за исключением лёгких газов, таких как водород и гелий. Поэтому считается, что хондриты образовались непосредственно из протопланетного облака, окружающего Солнце, путём конденсации вещества и аккреции пыли с промежуточным нагреванием.

Ахондриты составляют 7,3 % каменных метеоритов. Это обломки протопланетных (и планетных?) тел, прошедшие плавление и дифференциацию по составу (на металлы и силикаты).

Железные метеориты состоят из железоникелевого сплава. Они составляют 5,7 % падений.

Железосиликатные метеориты имеют промежуточный состав между каменными и железными метеоритами. Они сравнительно редки (1,5 % падений).

Ахондриты, железные и железосиликатные метеориты относят к дифференцированным метеоритам. Они предположительно состоят из вещества, прошедшего дифференцировку в составе астероидов или других планетных тел. Раньше считалось, что все дифференцированные метеориты образовались в результате разрыва одного или нескольких крупных тел, например, планеты Фэтона. Однако анализ состава разных метеоритов показал, что с большей вероятностью они образовались из обломков многих крупных астероидов.

Ранее выделяли ещё тектиты, куски кремнистого стекла ударного происхождения. Но позже оказалось, что тектиты образуются при ударе метеорита о горную породу, богатую кремнеземом.

Кристаллы хибонита в метеоритах, образовавшиеся тогда, когда протопланетный диск только начал остывать, содержат гелий и неон.



Рисунок 20.1. Классификация метеоритов

Структура хондритов

- Досолнечные пылинки
- Кальций-алюминиевые включения (CAI)
- Хондры

Кальций-алюминиевые включения

- *Шпинель ($MgAl_2O_4$)*
- *Мелилит ($Ca_2Al_2SiO_7-Ca_2MgSi_2O_7$)*
- *Гибонит ($CaMg_xTi_xAl_{12-2x}O_{19}$)*
- *Анортит ($CaAl_2Si_2O_8$)*
- *Пироксен ($CaMgSi_2O_6-CaAl_2SiO_6-CaTi_4+Al_2O_6-CaTi_3+AlSiO_6$)*
- *Перовскит ($CaTiO_3$)*

- *Гроссит* ($CaAl_4O_7$)
- *Корунд* (Al_2O_3)
- *Оливин* (*форстерит*, Mg_2SiO_4)

Первичный рост пылинок, возникновение метеоритов, планетезималей и зародышей планет. Проблемы возникновения некоторых планет

Первичный рост пылинок

- Ключевой фактор — взаимодействие пылинок с газом
- Столкновения с небольшими скоростями
- Слипание до размеров порядка сантиметра
- Образование CAI

Барьеры роста пылинок

- Барьер отскока
- Барьер дробления
- Дрейфовый барьер
- Электростатический барьер
- **Метровый барьер** и пути его преодоления:
 - Пористые пылинки
 - Пылинки с богатым содержанием летучих соединений
 - Галечная аккреция (галька=хондры?)

Дифференцированные метеориты

- Железные
- Железокаменные
- Каменные (ахондриты), сходны с базальтами

Дифференциация произошла в первые миллионы лет (или в даже в первый миллион лет) жизни Солнечной системы, одновременно с образованием хондр или до него

Причина — распад $^{26}Al \rightarrow ^{26}Mg$ (730 тыс. лет)

Хондриты — фрагменты тел, слишком малых, чтобы испытать дифференциацию

Модель Большой Оверштаг. Модель из Ниццы. Общие закономерности образования планетных систем

Большой оверштаг (Grand Tack)

- Юпитер мигрирует к центру Солнечной системы
- Сатурн догоняет Юпитер
- Миграция Юпитера останавливается в 1.5 а.е. от Солнца и меняется на противоположную

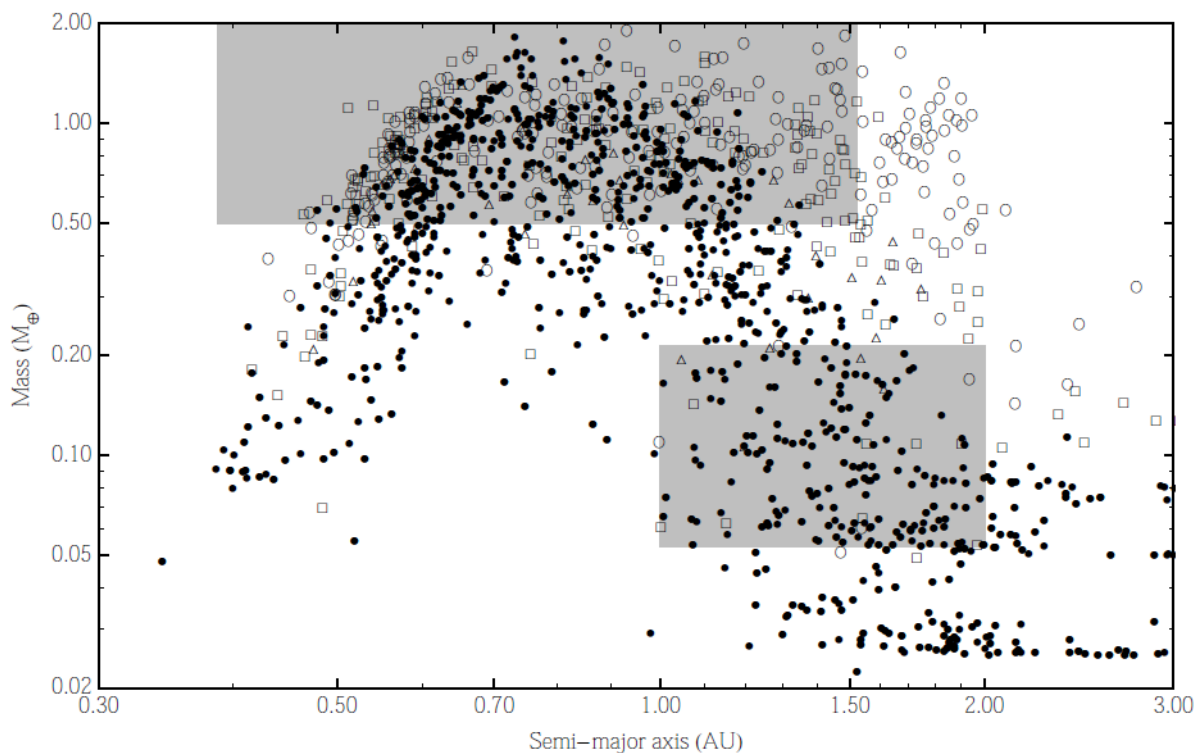


Рисунок 20.2. Массы планет в модели Большого Оверштага

Модель из Ниццы

Начальное положение планет-гигантов более компактно (и вполне может согласовываться с Большим оверштагом)

Взаимодействие с поясом Койпера приводит к миграции Сатурна, Урана и Нептуна наружу и к миграции Юпитера внутрь Солнечной системы

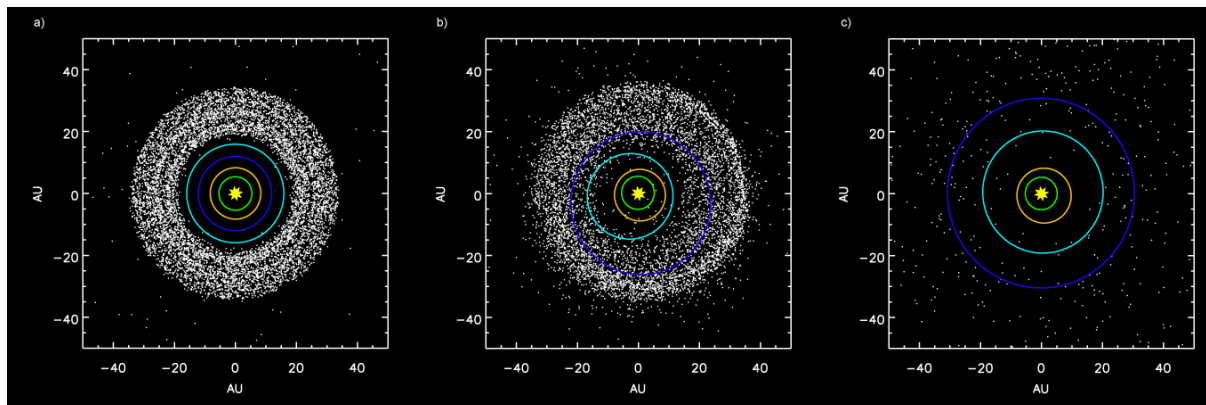


Рисунок 20.3. Модель из Ниццы

Резонанс приводит к вбросу большого количества планетезималей в центральную область Солнечной системы (поздняя бомбардировка)

Часть планетезималей летит в противоположную сторону (троянки Юпитера, иррегулярные спутники планет-гигантов, современный пояс Койпера, облако Оорта)

Общие закономерности образования планетных систем

- Формирование звезды практически неизбежно сопровождается формированием газопылевого диска
- Через диск происходит аккреция (остатков) вещества на звезду, иногда со вспышками
- В диске образуются зародыши планет земного типа и планет-гигантов
- В некоторых протопланетных системах (в частности, в Солнечной системе) возможна значительная миграция планет

Солнечная система

- Образование Солнечной системы длилось несколько десятков миллионов лет
- Формирование современной структуры Солнечной системы длилось несколько сотен миллионов лет и было достаточно бурным
- Конечный результат определялся как неизбежными процессами, так и некоторым набором случайностей
- Некоторые свойства Солнечной системы таковы, каковы они есть, просто потому что «так получилось»
- Являемся ли мы одним из этих свойств?

Проблема возникновения жизни

- *Органические и неорганические вещества, абиогенез*
- *Эксперименты Миллера-Юри (1952) — вода+метан+аммиак+молекулярный водород+CO=аминокислоты, сахара и пр.*

В поисках истоков жизни во Вселенной

- Органические соединения высокой сложности синтезируются в межзвёздной среде и даже в звёздах нашей и других галактик
- Они могут сохраняться в протопланетных дисках и входить в состав планетезималей
- Органика с метеоритами и по сей день попадает на Землю в «нетронутом» виде

Лекция 21

Проблема углового момента в теории планетообразования. Природа аккреции. Физические параметры, несущие информацию о протопланетных дисках

Решаемые проблемы:

- Проблема углового момента
- Время жизни
- Масса диска
- Темп аккреции
- Механизмы планетообразования

Момент импульса (кинетический момент, угловой момент, орбитальный момент, момент количества движения) характеризует количество вращательного движения. Величина, зависящая от того, сколько массы вращается, как она распределена относительно оси вращения и с какой скоростью происходит вращение.

Следует учесть, что вращение здесь понимается в широком смысле, не только как регулярное вращение вокруг оси. Например, даже при прямолинейном движении тела мимо произвольной воображаемой точки, не лежащей на линии движения, оно также обладает моментом импульса. Пожалуй, наибольшую роль момент импульса играет при описании собственно вращательного движения. Однако он крайне важен и для гораздо более широкого класса задач (особенно, если в задаче есть центральная или осевая симметрия — но и не только в этих случаях).

Замечание: момент импульса относительно точки — это псевдовектор, а момент импульса относительно оси — псевдоскаляр.

Момент импульса замкнутой системы сохраняется. Момент импульса является одним из трёх аддитивных (энергия, импульс, момент импульса) интегралов движения

Аккреционные диски, образуемые газом, перетекающим на компактные звёзды (белые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры) от звёзд-компаньонов в двойных системах. А. д. проявляют себя рентг. излучением, а в оптич. диапазоне затмениями видимой звезды, переменностью блеска вследствие неустойчивости или прецессии диска, а также характерным раздвоением спектр. линий. А. д. ответственны за многие наблюдательные проявления двойных рентг. источников, вспышечных (взрывных) переменных, звёзд типа U Близнецов и т. д. А. д. излучают как за счёт выделения гравитационной энергии при аккреции вещества, так и вследствие переработки и переизлучения поверхностью внеш. областей диска жёсткого (коротковолнового) излучения центрального источника и внутр. областей диска. Дисквая аккреция вещества (аккреция вещества с большим моментом количества

движения, приводящая к образованию А. д.) на сверхмассивные чёрные дыры явл. одним из наиболее распространённых объяснений активности ядер галактик и квазаров. Разрабатывается также теория дисковой аккреции межзвёздного газа на одиночные нейтронные звёзды и чёрные дыры. Протопланетный газопылевой диск, по-видимому, во многом был подобен А. д.

Теоретические модели строения протопланетного диска. Молекулярное строение дисков. Проблема перемешивания

Моделирование физической структуры дисков

- Двухслойные модели (Chiang & Goldreich 1997)
- 1+1D модели (D'Alessio et al. 1998)
- Пассивные и активные (проблема углового момента и модель вязкости)
- Эволюция пыли

Приведенные модели пригодны для описания как периодических, так и непрерывных процессов. Основной проблемой для периодического процесса остается правильное задание начального распределения частиц по объему дисперсной системы. Если использовать модели, построенные на основе марковских процессов, то в силу их эргодичности можно утверждать, что при достаточно длительном времени проведения процесса начальное состояние смеси не будет оказывать влияние на результат перемешивания. Конечный результат будет зависеть от интенсивности воздействия рабочих органов на дисперсный материал и свойств исходных компонентов.

Проблема светимости. Фуоры, эксоры, природа их вспышек, химические последствия вспышек

Природа вспышек

- Тепловая неустойчивость
- Внешние возмущения
- Гравитационная неустойчивость

Физическая модель

- *Одноточечная (плотность, температура, нормализованное поле излучения, скорость ионизации космическими лучами и рентгеном)*
- *Миллион лет эволюции в молекулярной облаке*

- *Спокойный довспышечный этап (длительность в базовой модели 500 тыс. лет)
Вспышка (начинается и заканчивается мгновенно, длительность в базовой модели 100 100раз)*
- *Послевспышечный этап (до 10 тыс лет)*

Фуоры — редкий тип нестационарных звёзд, находящихся на ранней стадии звёздной эволюции; назван по звезде FU Ориона (FU Ori). Блеск этой звезды в течение полугода (в 1936-1937 гг.) возрос от 16^m до 10^m и в последующие 40 лет ослабел всего лишь на 1,5^m. Сейчас по распределению энергии в оптическом диапазоне FU Ориона близка к звезде спектрального класса F—G повышенной светимости, но состояние её до вспышки осталось неизвестным. В 1969-1970 гг. была зарегистрирована сходная вспышка звезды V1057 Лебедя, но на этот раз было установлено, что до вспышки она была переменной звездой типа Т Тельца.

Эксоры могут представлять собой объекты на несколько более поздней эволюционной стадии, в которых из-за общего снижения массы диска и темпа аккреции вспышки получаются менее мощными и менее длительными. Современные наблюдения указывают, что темп аккреции испытывает вариации и на меньших масштабах. Мониторинг протозвезд в облаках ОМС-2 и ОМС-3 («волокно в форме интеграла») показал, что примерно у половины из них светимость испытывает колебания с амплитудой более 20 % на временах порядка нескольких недель. Есть наблюдения хаотических вариаций светимости и с меньшей временной шкалой («фликеринг», менее одного дня), а также квазипериодических колебаний. Следует отметить, что вариации темпа аккреции с разными амплитудами и характерными временами могут вызываться разными причинами. В последнее время появилась информация об объектах, которые испытывают короткие вспышки аккреции на ранних эволюционных стадиях. Отмечены также длительные вспышки аккреции на классических звездах типа Т Тау.

Проблема возникновения жизни. Астробиология. Планеты у других звезд, способы их обнаружения и исследования. Зона обитаемости, землеподобные планеты

Астро+био=логия

- Астроботаника
- Экзобиология
- Ксенобиология
- Биоастрономия

Уравнение Дрейка (1961)

- $N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$
 - N — число цивилизаций в нашей Галактике, с которыми в данный момент можно установить связь
 - R_* — скорость звездообразования в Галактике
 - f_p — доля звёзд с планетами
 - n_e — среднее количество планет в одной планетной системе, способных породить и поддерживать жизнь
 - f_l — доля планет, на которых действительно возникла жизнь
 - f_i — доля планет, на которых возникла разумная жизнь
 - f_c — доля цивилизаций, обладающих технологией, которая может быть обнаружена извне
 - L — длительность этапа эволюции цивилизации, когда она генерирует обнаружимые сигналы
 - f_l — доля планет, на которых действительно возникла жизнь
 - f_i — доля планет, на которых возникла разумная жизнь
 - f_c — доля цивилизаций, обладающих технологией, которая может быть обнаружена извне
 - L — длительность этапа эволюции цивилизации, когда она генерирует обнаружимые сигналы
- Уравнение Дрейка — не ответ, а список вопросов

Условия для появления жизни

- Как и в каких условиях **появилась и существует** жизнь на Земле?
- Каковы условия появления **разумной жизни**?
- Насколько часто такие условия встречаются во Вселенной?
- Возможны ли другие формы жизни?
- Куда смотреть и что искать?

Земной шовинизм («жизнь есть форма существования белковых тел»)

Интересны ли нам ВЦ, непохожие на нашу? (И зачем вообще искать внеземной разум?)

Условия для «комфортного» существования жизни

- Источник энергии
- Химическая основа
- Растворитель
- Поверхность

Источник энергии

- Звезда
- Приливное воздействие

Проблемы с обитаемостью

- Вспышечная активность звезды
- Масса планеты (спутники?)
- Орбита и осевое вращение планеты (магнитосфера?)
- Химический состав атмосферы
- Химический состав коры
- Вулканическая активность

Как и где искать жизнь?

- Источники энергии
- Сложная органика
- Вода

Биомаркеры

- Газ атмосферы (молекулярный кислород, метан)
- Свойства поверхности («красный край», блики на поверхности океана)
- Периодичность

Земля в Солнечной системе и Галактике

- Наличие Луны
- Наличие Юпитера
- Параметры звезды

- Расположение в межзвёздной среде
- Расположение в Галактике
- Свойства самой Галактики

В поисках истоков жизни во Вселенной

- В Космосе очень много органики
- В Космосе очень много воды
- В Космосе очень много планет
- В Космосе есть землеподобные планеты, попадающие в зону обитаемости
- Что это значит, пока неясно
- На некоторых из этих планет можно искать и находить биомаркеры
- Что это значит, пока неясно
- Пока для всех параметров уравнения Дрейка мы получаем оптимистические оценки
- Что это значит, пока неясно

Лекция 22

Структура астрохимических исследований. Экспериментальные направления: моделирование фотодесорбции молекул и частиц космической пыли

Под структурой астрохимических исследований понимают возможность работы с недостижимым объектом. То есть, астрохимические наблюдения, лабораторные исследования и моделирование астрохимических процессов.

Адсорбция — самопроизвольный процесс увеличения концентрации растворённого вещества у поверхности раздела двух фаз вследствие некомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия на разделе фаз. Адсорбция является частным случаем сорбции, процесс, обратный адсорбции — десорбция. Процесс фотодесорбции подразумевает собой процесс обратный адсорбции под воздействием фотонов света.

Теоретико-экспериментальные направления исследований: моделирование спектров оксидов железа, алюминия, кальция

Как уже много раз упоминалось ранее, все исследования межзвездной среды сводится к моделированию и построению спектров. Подобные анализы спектральных линий способствуют изучению химического аспекта космических тел, то бишь моделирование спектров различных химических веществ помогает идентифицировать наличие или отсутствие проверяемых веществ, не прибегая к эмпирическому методу исследования.

Теоретические направления исследований: поиск и анализ спектральных переходов, позволяющих проверить гипотезу об изменении фундаментальных констант за время существования Вселенной

Стандартная модель имеет определённые пробелы. Да, она описывает электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц. Но она не включает в себя гравитацию. Не даёт ответа на вопрос, что такое тёмная материя. И самое главное — она не способна объяснить, почему у нынешних фундаментальных физических констант именно такие значения. Стандартная модель также не способна объяснить или предсказать зависимость фундаментальных физических постоянных от переменных факторов, таких как пространство и время.

Поэтому физики вполне логично задаются вопросом, менялись ли со временем фундаментальные постоянные. И если менялись, то каким образом. Поскольку теория не способна нормально объяснить значения постоянных и их изменение, то остаётся единственный научный метод — прямое измерение значения фундаментальных постоянных в разных точках пространства-времени.

Для ответа на этот вопрос хорошо подходит постоянная тонкой структуры (ПТС) — одна из фундаментальных физических постоянных. ПТС определяет размер величины (расщепления) энергетических уровней атома и,

следовательно, образования тонкой структуры — набора узких и близких частот в его спектральных линиях. Расщепление происходит за счёт квантового эффекта, взаимодействия двух электронов атома в результате обмена виртуальными фотонами.

Постоянная тонкой структуры — это безразмерная величина, образованная комбинацией других фундаментальных констант

Но если одна фундаментальная константа меняется со временем, то можно предположить, что могут меняться и другие фундаментальные константы. Исходя из эволюции Вселенной, они должны меняться и сейчас, если это постоянный процесс. Сразу возникают вопросы: какие именно фундаментальные константы меняются?

Более того, появляется много новых теорий, которые пытаются исправить Стандартную модель — объединить, наконец, её с гравитацией. И эти теории предусматривают изменение фундаментальных констант со временем.

Учёные считают, что некорректные данные предыдущих измерений спектра квазаров объясняются тем, что другие учёные использовали не очень точные методы, в том числе на спектрографе Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph на телескопе Very Large Telescope (VLT) в Европейской южной обсерватории. Авторы нового исследования нашли способ скорректировать показания этого спектрографа с помощью другого спектрографа. Они предположили, что наблюдаемая дельта скорости (красное смещение — сдвиг спектральных линий) объясняется именно разницей в физической скорости объектов, а не дельтой ПТС. Авторы уверены, что устранили систематическую ошибку во всех предыдущих исследованиях, которые показывали разницу в ПТС (этих исследований около десятка).

Данный эксперимент противоречит другим экспериментальным данным, зато подтверждает Стандартную модель и по-прежнему не позволяет совместить силу гравитации с остальными видами взаимодействий в рамках единой теории. Но учёные наверняка продолжают эти попытки. Уже через несколько лет они смогут более точно измерить спектр квазаров на новых телескопах с более точными спектрографами.

Если предположить, что Стандартная модель устояла, у учёных всё равно нет ответа на вопрос, почему 8,5 млрд лет назад фундаментальные физические постоянные были такими же, как и сейчас



ХИМИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ