

# Проблемы современной астрофизики и геофизики

## Радиопульсары

(Кафедра проблем физики и астрофизики ФОПФ, ФИАН, отв. В.С.Бескин)  
11, 18 и 25 сентября, 2 и 9 октября

### Лекции

1. Наблюдения. Основные параметры – масса, радиус, величина магнитного поля на поверхности. Магнитодипольный механизм торможения. Эволюция угла наклона и периода звезды. Проблема braking index. Строение вакуумной магнитосферы. Структура электрического поля. Рождение пар фотоном в сильном поле. Длина пробега фотона. Длина ускорения электрона. Минимальный лоренц-фактор частиц вторичной плазмы. Устройство полярного зазора. Оценка высоты зазора. Одномерная теория в моделях Аронса и Рудермана-Сазерленда.
2. Строение магнитосферы, заполненной плазмой. Формализм уравнения Грэда-Шафранова для осесимметричных стационарных конфигураций. Пульсарное уравнение. Аналитическое решение с нулевым продольным током для соосного и наклонного ротаторов. Экранировка магнитодипольного излучения. Численные модели магнитосферы с ненулевым продольным током, от СКФ до Спитковского. Торможение радиопульсаров. Токовый механизм потерь, потери в решении Спитковского.
3. Радиоизлучение. Модель полого конуса. Наблюдательные следствия. Векторная модель, ход позиционного угла в профиле. Наблюдательное соотношение «beam width – pulsar period» для core профилей. Дрейф субимпульсов. Определение поперечной структуры электрического потенциала в зазоре. Поправка, связанная с абберацией. Возможные механизмы радиоизлучения. Нормальные моды в сильно замагниченной плазме. Эффекты распространения – циклотронное поглощение, преломление, перенос поляризации.

### Лабораторные работы

1. Симуляция профилей радиопульсаров. Определение углов наклона по поляриметрии с помощью векторной модели.
2. Определение углов наклона по поляриметрии с учетом эффектов распространения в магнитосфере.
3. Определение радиуса отрыва по сдвигу кривой позиционного угла.

# **Временная переменность как инструмент исследования физических процессов вблизи компактных объектов**

(Кафедра космической физики, ИКИ, отв. М.Ревнивцев)  
16, 23 и 30 октября

## **Лекции**

1. Общая информация о характеристиках временных рядов. Ряды Фурье, поиск периодического сигнала, Z-статистика, метод наложения эпох. Статистические свойства характеристик сигнала и методы оценки достоверности.
2. Общая информация о компактных, объектах, характерных временных масштабах и основных физических процессах, ответственных за хаотические или периодические вариации их яркости в разных частях электромагнитного спектра.
3. Обзор периодических вариаций яркости различных релятивистских объектов, вращение, физические пульсации, осцилляции и их связь с характеристиками компактных объектов или вещества вокруг них.
4. Аперодическая переменность, фликкер-шум. Аккреционные диски как генераторы широкополосного шума яркости. Характеристики широкополосного шума, содержащие информацию о физических свойствах материи вблизи компактных объектов.

## **Лабораторные работы**

1. Получение спектра мощности (Фурье образ зависимости яркости источника от времени) переменности двойной системы с нейтронной звездой из данных наблюдений.  
Квазипериодические осцилляции.
2. Получение из данных наблюдений профиля импульса аккрецирующего миллисекундного рентгеновского пульсара - быстровращающейся нейтронной звезды с магнитным полем.  
Моделирование искажения профиля импульса за счет эффектов специальной теории относительности.
3. Получение характеристик переменности яркости компактных объектов в оптическом диапазоне на примере наблюдений наземных телескопов. Моделирование влияния скважности измерения.

# **Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой**

(АКЦ ФИАН отв. С.В. Чернов, М.С. Лисаков)

6, 13 и 20 ноября

## **Лекции**

1. Механизмы радиоизлучения в астрофизических условиях.

Приводятся основные сведения об источниках и механизмах радиоизлучения в астрофизических условиях. Обсуждаются тормозное излучение ионизованного газа, синхротронное излучение, изгибное излучение, излучение в спектральных линиях атомов и молекул. Помимо механизмов радиоизлучения, уделяется внимание распространению радиоизлучения в плазме и поляризации радиоизлучения.

2. Введение в радиоинтерферометрию со сверхдлинными базами.

Проводится введение в РСДБ. Вводятся основные определения и соотношения. Рассказывается о первых экспериментах и об различии РСДБ и обычной интерферометрии. Основное внимание уделяется таким вопросам как: поиск лепестков для многомерной решётки, фазовая стабильность и атомные стандарты частоты, системы регистрации, системы обработки данных, синтез полос частот, орбитальная РСДБ.

3. Эффекты распространения радиоизлучения.

Рассматриваются эффекты распространения излучения в межпланетной и в межзвёздной среде, а также влияние атмосферы на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Особое внимание уделяется рассеянию на неоднородностях плазмы. Отдельно рассматриваются эффекты межзвёздной среды: нейтральный водород, зоны НII, гигантские молекулярные облака, области звездообразования и молекулярные мазеры.

## **Лабораторные работы**

1. Построение РСДБ карт.

Используя калиброванные данные функции видности, построить РСДБ карты источника(ов) на разных частотах.

2. Изучение кинематики струй активных галактических ядер

Определение скорости движения компонента струи по картам на нескольких эпохах.

3. Обнаружение смещения РСДБ ядра

Определение зависимости смещения РСДБ ядра от частоты.

4. Обнаружение поперечного градиента меры вращения

Построение карты распределения меры Фарадеевского вращения, исследование её структуры в направлении, перпендикулярном направлению струи.

## **Космология**

(Кафедра проблем физики и астрофизики ФОПФ, ФИАН, отв. С.Пилипенко)

27 ноября, 4 и 11 декабря

### **Лекции**

1. Расширение Вселенной. Решения уравнений Фридмана, в т.ч. с Лямбда-членом. Методы измерения расстояний до внегалактических объектов. Обзор современных результатов определения параметров Вселенной (анизотропия реликтового излучения, сахаровские осцилляции, функция масс скоплений галактик).
2. Крупномасштабная структура. Генерация малых возмущений в ранней Вселенной. Космологический спектр мощности и анизотропия реликтового излучения. Ячеистая структура, приближение Зельдовича. Понятие корреляционной функции и другие способы описания распределения вещества в пространстве.
3. Эволюция галактик. Гало темной материи. Разнообразие галактик. Проблемы возникновения первых звезд, сверхмассивных черных дыр. Вторичная ионизация Вселенной. Гало темной материи, иерархическое сгущивание (слияния галактик). Описание методов численного моделирования эволюции галактик, гало и крупномасштабной структуры.

### **Лабораторные работы**

1. Определение постоянной Хаббла по данным наблюдений. Использование астрофизической базы данных внегалактических объектов NASA NED для построения диаграммы красное-смещение – расстояние.
2. Корреляционная функция галактик. Измерение корреляционной функции распределения галактик в крупных обзорах неба (SDSS, 2dF и др.).
3. Численное моделирование образования гало. Задаются начальные условия в виде однородного облака пылевидной материи и выполняется моделирование методом N тел. Задача состоит в наблюдении процесса бурной релаксации и измерении параметров получившегося вириализованного сгустка.

## **Динамика вещества в тесных двойных звездах**

(Кафедра нелинейных и динамических процессов в астрофизике и геофизике, ИНАСАН, отв. Д.В.Бисикало)

### **Лекции**

#### 1. Общие сведения о тесных двойных звездах.

Приводятся основные сведения о тесных двойных системах и о физике процессов обмена веществом в них. Обсуждаются физические и математические модели для описания газодинамических течений в тесных двойных системах. Помимо собственно газодинамических процессов, уделяется внимание влиянию излучения и магнитного поля.

#### 2. Численное моделирование течений в тесных двойных системах.

Проводится описание общих принципов численного моделирования газовых потоков в тесных двойных системах. Представлен обзор основных современных численных методов, наиболее часто применяемых для решения газодинамических астрофизических задач такого типа. Уделяется внимание различным проблемам, с которыми приходится сталкиваться при решении таких задач с помощью численного моделирования.

#### 3. Наблюдательные проявления элементов структуры течения в тесных двойных звездах.

Рассматриваются используемые в настоящее время методы выявления различных элементов структуры течения в тесных двойных системах по их наблюдательным проявлениям. Особое внимание уделяется таким методам, как анализ кривых блеска и метод доплеровской томографии.

### **Лабораторные работы**

#### 1. Движение пробных частиц в поле двойной системы.

Исследование динамики пробных частиц в поле двойной звезды для различных отношений масс компонентов.

#### 2. Формирование аккреционного диска.

Изучение в рамках диффузионной модели процесса формирования и основных особенностей аккреционных дисков в тесных двойных системах.

#### 3. Синтетические доплеровские карты.

Построение синтетической доплеровской карты по заданным модельным распределениям скорости, плотности и температуры, определяющим структуру течения в тесной двойной системе.

## **Скопления галактик**

(Кафедра космической физики, ИКИ РАН, отв. Буренин Р. А.)

### **Лекции**

#### 1. Наблюдения скоплений галактик.

Скопления галактик в оптическом диапазоне, поверхностная плотность числа галактик, красная последовательность. Горячий газ внутри скоплений галактик, наблюдения в рентгеновском диапазоне. Эффект Сюняева-Зельдовича, наблюдения скоплений в мм-диапазоне. Автомодельная теория эволюции скоплений галактик, корреляционные соотношения между наблюдаемыми величинами. Способы измерения масс скоплений. Обзоры скоплений галактик, полнота и чистота обзора. Измерения кривой подсчетов, функции светимости, функции масс.

#### 2. Функция масс скоплений галактик.

Рост линейных возмущений плотности в расширяющейся Вселенной. Сферический нелинейный коллапс. Функция масс Пресса-Шехтера, способы построения более точной функции масс скоплений: теоретические и основанные на численных моделированиях.

#### 3. Космологические ограничения по измерениям функции масс скоплений галактик.

Природа ограничений на среднюю плотность вещества во Вселенной, амплитуду линейных возмущений плотности, суммарную массу нейтрино, параметры уравнения состояния темной энергии и др., которые получаются из измерений функции масс скоплений. Совместные ограничения при объединении с другими космологическими данными (спектр мощности анизотропии реликтового излучения, измерения постоянной Хаббла, барионные акустические осцилляции). Исследование пространства параметров при помощи марковских цепочек. Перспективы дальнейшего уточнения измерений космологических параметров.

### **Лабораторные работы**

#### 1. Поиск скоплений галактик на оптических и рентгеновских изображениях.

#### 2. Построение несмещенной кривой подсчетов в обзоре, ограниченном по потоку.

#### 3. Получение космологических ограничений при помощи моделирования марковских цепочек космологических параметров.

# **Неустойчивости и структуры в газовых дисках галактик**

(Кафедра нелинейных и динамических процессов в астрофизике и геофизике, ИНАСАН, отв. Ю.М.Торгашин)

## **Лекции**

1. Газовые диски плоских галактик: уравнения двумерной гидродинамики.

Наблюдательные данные. Кривая вращения. Распределения поверхностной плотности и температуры газа в плоских (спиральных) галактиках. Система уравнений двумерной гидродинамики. Условия применимости 2-D описания.

2. Описание динамики возмущений малой амплитуды в газовом галактическом диске.

Равновесное осесимметричное состояние диска. Линеаризованная система уравнений для возмущений малой амплитуды. Условия пренебрежения самогравитацией. Нормальные моды возмущений.

3. Неустойчивые спирально-вихревые структуры в газовом галактическом диске в модели скачка угловой скорости вращения.

Решения для собственных функций линейных возмущений в модели кусочно-постоянной угловой скорости вращения диска. Условия сшивки решений на скачке угловой скорости вращения.

Дисперсионное уравнение собственных частот колебаний. Аналитические решения дисперсионного уравнения при малых и больших значениях параметра Маха. Неустойчивые моды Кельвина-Гельмгольца и центробежные моды.

## **Лабораторные работы**

1. Численное исследование неустойчивых спиральных мод собственных возмущений газового галактического диска в модели скачка угловой скорости вращения.

Программирование на MATLAB'e дисперсионного уравнения.

2. Поиск комплексных собственных значений методом выявления локальных минимумов функционала, описывающего невязку приближенного и точного решений дисперсионного уравнения.

3. Вычисление и анализ поведения собственных значений для основных крупномасштабных мод возмущений.

Расчет и построение (с помощью MATLAB'a) собственных функций задачи.

Анализ поведения спиральных структур, порождаемых неустойчивыми модами колебаний в газовом галактическом диске.

# **Комптонизация и формирование спектров рентгеновского излучения астрофизических объектов**

(Кафедра космической физики, ИКИ, отв. С.Ю. Сазонов)

## **Лекции**

1. Рассеяние излучения на свободных электронах. Обмен энергией между фотонами и электронами, сечение рассеяния, длина свободного пробега. Давление света, эддингтоновская критическая светимость. Спектр линии в результате однократного рассеяния.
2. Взаимодействие рентгеновских лучей с холодным веществом. Облучение молекулярных облаков рентгеновским излучением в ядре Галактики. Комптоновское отражение от аккреционных дисков. Рентгеновское излучение сверхновых звезд.
3. Комптонизация. Уравнение Компанейца. Искажение спектра реликтового излучения Вселенной в горячем газе скоплений галактик (эффект Сюняева–Зельдовича). Комптонизация в облаке горячего газа. Решение Сюняева–Титарчука. Расчеты спектров методом Монте-Карло.

## **Лабораторные работы**

1. Расчет методом Монте-Карло профиля рентгеновской линии после однократного рассеяния в облаке газа. Расчет методом Монте-Карло спектра реликтового излучения после прохождения через горячую атмосферу скопления галактик. Сравнение результатов с аналитическими приближениями.
2. Расчет методом Монте-Карло рентгеновских спектров, формирующихся в результате многократных рассеяний фотонов в облаке горячей плазмы. Сравнение результатов с аналитическими приближениями.
3. Определение характеристик горячей короны аккреционного диска в рентгеновских двойных системах и активных ядрах галактик по данным наблюдений рентгеновских обсерваторий.



# Вспышки сверхновых звёзд

(Кафедра: Теоретическая астрофизика и проблемы термоядерной физики, ИТЭФ Ответственный: В.П. Утробин)

## Лекции

1. Общие сведения о сверхновых звёздах.

Происхождение термина "сверхновые звезды". Основные наблюдательные данные: спектры и кривые блеска. Классификация сверхновых. Статистика вспышек сверхновых. Остатки вспышек сверхновых. Галактические сверхновые. Крабовидная туманность. Звездные остатки вспышек сверхновых.

2. Радиационная гидродинамика.

Основные характеристики вещества и излучения. Процессы взаимодействия излучения и вещества. Коэффициенты поглощения, излучательной способности и рассеяния. Росселандово среднее. Локальное термодинамическое равновесие. Вывод уравнения переноса излучения.

Оптическая толщина и функция источника. Формальное решение уравнения переноса.

Диффузионный и волновой пределы. Моменты уравнения переноса. Уравнения радиационной гидродинамики. Диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности.

Уравнения радиационной гидродинамики в моментном приближении.

Многогрупповое приближение.

3. Моделирование вспышек сверхновых.

Внутренняя и внешняя задачи гидродинамического моделирования вспышки сверхновой.

Строение предсверхновых звезд. Гидродинамические модели. Генерация ударной волны и моделирование взрыва сверхновой. Выход ударной волны на поверхность предсверхновой.

Волна охлаждения и рекомбинации. Свойства радиоактивного распада  $Ni-56 \Rightarrow Co-56 \Rightarrow Fe-56$ . Сверхновая 1987A в Большом Магеллановом Облаке.

## Лабораторные работы

1. Модели предсверхновых звезд

Аналитическая теория политропных газовых сфер.

Численное построение равновесных моделей.

2. Кривые блеска сверхновых

Аналитическое моделирование кривой блеска сверхновой.

Гидродинамические модели в приближении лучистой теплопроводности.

3. Спектры сверхновых Коэффициент поглощения в линии и перенос излучения. Перенос излучения в движущихся атмосферах. Теория Соболева.

## **Нуклеосинтез**

(Кафедра: Теоретическая астрофизика и проблемы термоядерной физики, ИТЭФ Ответственный: И.В. Панов)

### **Лекции**

1. Образование химических элементов в природе и ядерные реакции в звездах. Ядерная астрофизика: Механизм выработки энергии в звездах и нуклеосинтез; ядерные реакции. Основные характеристики звезд. Солнце: основные параметры - возраст, радиус, масса, светимость, температура на поверхности и в центре, средняя плотность на поверхности и в центре, удельное энерговыделение; Различные процессы нуклеосинтеза, приводящие к образованию химических элементов; их классификация; “Солнечная” распространенность элементов и карта ядер.
2. Ядерное статистическое равновесие и равновесный процесс. Уравнение состояния, стационарный и взрывной нуклеосинтез в условиях NSE; Горение водорода, CNO-цикл, Горение гелия, углерода и кислорода, кремния. Структура звезды при горении в центре и горении в слоевом источнике Равновесные процессы, понятие о ядерномстатистическом равновесии. Субъядерная область плотностей: ядра с большим значением массового числа, нейтронно-избыточные ядра, фазовый переход к однородной ядерной материи, остановка коллапса.
3. Нуклеосинтез под действием нейтронов. Условия и особенности протекания быстрого ( $\gamma$ ) и медленного ( $s$ ) нуклеосинтеза ; статические и динамические модели нуклеосинтеза тяжелых ядер, проблема зародышевых ядер и источника нейтронов; сценарии  $\gamma$ -процесса: Основная и слабая компоненты  $\gamma$ -процесса; слияние нейтронных звезд; взрывы сверхновых и ветра различной природы; численное моделирование.

### **Лабораторные работы**

1. Определение области нуклеосинтеза и численное моделирование нуклеосинтеза. Построение сетки ядерных реакций для разных типов нуклеосинтеза; решение уравнений, описывающих процессы образования элементов, (скорости реакций – под действием нейтронов; радиоактивный распад, слабое взаимодействие; деление и запаздывающие процессы).
2. Нуклеосинтез при высоких плотности и температуре  
Расчеты концентраций в рамках NSE, наиболее обильные изотопы как функции термодинамических параметров. Влияние возбужденных уровней ядер (статсуммы). Влияние кулоновского взаимодействия: предел слабого взаимодействия (Дебаевский предел), предел сильного взаимодействия: приближение Вигнера-Зейтца, правило линейного смешивания.
3. Численное моделирование нуклеосинтеза при высоких плотности и температуре Уравнение состояния в звёздах, ионизация вещества. Уравнение состояния для сверхновых звёзд, фотодиссоциация железа, потеря гидродинамической устойчивости, коллапс.