

Основы Релятивистской Астрофизики

Осенний семестр 2012 г.

Часть 1. Сентябрь – октябрь 2012. Лекции С.И.Блинникова

1. Первые понятия релятивистской астрофизики

Звёзды, галактики, сверхновые, гамма-всплески, квазары

Компактные *релятивистские* объекты — нейтронные звёзды и чёрные дыры.

Тёмная материя.

Тёмная энергия.

Красное смещение и замедление времени в гравитационном поле.

Первые понятия космологии.

Красное смещение в космологии.

Основы астрометрии, астрофизики и космографии.

Небесные координаты.

Измерение излучения.

Измерение расстояний.

Мир звёзд, их классификация.

Взрывающиеся звёзды - новые и сверхновые.

Звёздные скопления и скопления галактик.

Установление астрономических и физических единиц. Масса Планка в равновесии звёзд.

Проверки Ньютоновской гравитации в лаборатории, в солнечной системе, в двойных пульсарах и на масштабах галактик.

2. Основные понятия релятивистской гравитации

Мотивация к релятивистской гравитации – парадокс Лапласа (якобы скорость распространения гравитации на много порядков больше скорости света).

Принцип эквивалентности (сильный и слабый).

Система отсчёта и система координат.

Общая Теория Относительности (ОТО).

Мир как пространство-время. Искривлённый мир. Метрика, метрический тензор.

Геодезические. Геодезический лагранжиан. Аффинный параметр.

Метрика Шварцшильда. Запись в шварцшильдовских, в изотропных и в гармонических координатах.

Орбиты в метрике Шварцшильда. Искривление лучей света.

Экспериментальная проверка ОТО.

Контравариантные, ковариантные, смешанные тензоры.

Символы Кристоффеля, снова уравнение геодезической и вычисление ненулевых кристоффелей (символы Кристоффеля из геодезического лагранжиана).

Параллельный перенос и ковариантные производные. Избыток суммы углов треугольника – мера кривизны.

Введение тензора кривизны. Символы Кристоффеля и внутренняя кривизна: нужна ли теорема Стокса для их связи. Вычисление компонент тензоров Римана и Риччи.

3. Уравнения для гравитационного поля.

Вариационный принцип Гильберта на конкретных примерах.

Кристоффели для сферически-симметричной метрики (вычисление вручную из геодезического лагранжиана). Вычисление вручную компонент тензора Риччи для той же метрики.

Вывод метрики Шварцшильда из действия Гильберта. Ньютоновская гравитация как предел решения Шварцшильда в слабом поле.

Граничные члены. Действие Йорка-Гиббонса-Хокинга (York–Gibbons–Hawking action).

Уравнения Эйнштейна (набросок “вывода”).

Доказательство движения материальной точки по геодезической из условия зануления ковариантной дивергенции тензора энергии-импульса.

Доказательство обнуления ковариантной дивергенции тензора Эйнштейна из вариационного принципа. Вывод попутно с введением векторов Киллинга.

4. От равновесия к взрывам

Понимание квазиравновесия звезды. Динамическое, тепловое и ядерное характерные времена.

Механическое равновесие. Классические и квантовые законы динамики. Вариационные принципы для действия и для энергии.

Как квантовая механика помогает понять классическую физику и равновесие звёзд.

Движения частиц и равновесие звезды. Простейшие гамильтонианы. Теорема вириала для частицы в атоме или в ящике, для звезды и для звёздной системе. Её связь с уравнением состояния. Вариации энергии и механическая устойчивость звезды.

Уравнение состояния идеального квантового газа. Ультра-релятивистский ферми-газ. Замечание о химическом потенциале и поляризации плазмы звезды.

5. Основы физической космологии.

Форма метрики в записи Фридмана и в записи Робертсона–Уокера. Кристоффели для метрики FRW (вычисление вручную из геодезического лагранжиана). Тензор Риччи в той же метрике.

Полное действие Гильберта (кривизна плюс вещество). Уравнение Фридмана из вариационного принципа. Опять граничные члены. Давление как источник гравитации. Связь уравнений Фридмана с термодинамикой. Ньютонов предел. Тёмная Материя и Тёмная Энергия.

6. Практическая космология.

Красное смещение в космологии, связь с масштабным фактором, трудности сведения его к доплер-эффекту.

Параметр или постоянная Хаббла, параметр плотности. Поведение решений в моделях Фридмана.

Космография: расстояния во Вселенной. Фотометрическое расстояние, вывод формулы его связи с космологическим красным смещением источника. Явные формулы для частных случаев космологических моделей.

7. Реликтовое излучение

Горизонт в современной Вселенной. Рекомбинация в горячей вселенной, понятие о поверхности последнего рассеяния. Информация, содержащаяся в спектре реликтового излучения.

8. Равновесие и устойчивость релятивистских звёзд, энергетика аккреции.

Релятивистские звезды. Метрика внутри сферически-симметричной звезды (качественно). Релятивистская энергия связи звезды. Уравнение механического равновесия звезды.

Набросок вывод уравнения Оппенгеймера-Волкова для равновесия статической релятивистской звезды из вариационного принципа Гильберта. Потеря устойчивости, коллапс. Статический критерий механической устойчивости.

Активные ядра галактик, сверхмассивные чёрные дыры и квазары.

Часть 2. Ноябрь 2012. Лекции А.В.Юдина

9. Строение звезд и их эволюция

Источники энергии звёзд: гравитация

Уравнения звёздной структуры

Конвекция

Источники энергии звезд: ядерная. Примеры ядерных реакций. pp-цикл, CNO-цикл.

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

Эволюция в двойных системах

10. Взрывы сверхновых

Сверхновые: классификация

Сверхновые типа Ia — трудности получения “стандартной свечи”

Сверхновые с коллапсом ядра; причины коллапса:

фотодиссоциация

пары

нейтронизация

11. Уравнение состояния вещества сверхновой

Уравнение состояния идеального квантового газа (строгий вывод). Интегралы Ферми-Дирака.

Уравнение состояния горячей звездной плазмы. Понятие о ядерном статистическом равновесии, расчёт химического состава вещества, влияние статсумм ядер. Поправки на кулоновское взаимодействие.

Уравнение состояния при сверхвысокой плотности: причина остановки коллапса. Горячая и холодная ядерная материя.

12. Перенос фотонов и нейтрино в процессе взрыва

Кривые блеска сверхновых

Нейтринный сигнал

Излучение фотонов и нейтрино, кинетика, эффекты рассеяния, росселандово среднее.

Уравнение переноса. Эддингтоновское приближение. Уравнение переноса в движущихся средах.

Случай высокой непрозрачности вещества: диффузия фотонов (нейтрино).

13. Физика компактных объектов

Теория белых карликов: политропы, предел Чандрасекара, эффекты ОТО, нейтронизация вещества.

Нейтронные звезды: метрика внутри сферически-симметричной релятивистской звезды, уравнение равновесия Оппенгеймера-Волкова. Строение нейтронной звезды. Открытые вопросы: центральные области нейтронных звёзд, возможные фазы вещества. Максимальная масса нейтронных звёзд. Потеря устойчивости, коллапс.

Черные дыры: метрика Керра (без вывода). Энергия частицы в поле звезды в ОТО. Энерговыделение при аккреции. Эргосфера.