

ПРОГРАММА КУРСА

Релятивистские основы астрометрии и небесной механики

1 семестр: лекции - 28 часов

Введение (2 ч.)

Предмет релятивистской астрометрии и небесной механики. История развития релятивистской астрометрии и небесной механики. Дополнительное смещение перигелия Меркурия. Предлагавшиеся способы объяснения дополнительного смещения в рамках ньютоновской небесной механики. Появление СТО. Появление ОТО. Классические тесты ОТО. Развитие ОТО в 1920-1980 годах. Статус теории относительности в астрономии: ОТО – основа астрометрии и небесной механики. Чему и как мы собираемся учиться. Рекомендуемая литература к курсу.

I Элементы тензорного исчисления и римановой геометрии (5 ч.)

§ 1 Тензоры в евклидовых пространствах (2.7 ч.)

Векторы в евклидовом пространстве. Ковариантные и контравариантные компоненты векторов. Метрический тензор. Общее определение тензора. Основные операции над тензорами. Дифференцирование тензорных полей: частная и ковариантная производная. Символы Кристоффеля первого и второго родов. Абсолютная производная. Параллельный перенос вдоль кривой.

§ 2 Тензоры в римановых пространствах (1.5 ч.)

Определение риманова пространства. Метрический тензор риманова пространства. Касательное пространство. Геодезические. Тензор кривизны, тензор Риччи, скалярная кривизна.

§ 3 Псевдоевклидовы и псевдоримановы пространства (0.8 ч.)

Знакоопределенность метрической квадратичной формы. Сигнатура метрики. Собственно евклидовы и псевдоевклидовы пространства. Собственно римановы и псевдоримановы пространства. Особенности псевдоевклидовой и псевдоримановой геометрии.

II Основы общей теории относительности (5 ч.)

§ 1 Ньютоновская механика и теория гравитации (1 ч.)

Пространство и время в ньютоновской физике: однородность пространства и времени, изотропность пространства, евклидовость пространства и времени, абсолютный характер времени. Инерциальные системы координат ньютоновской механики и принцип относительности

Галилея. Относительность пространства в ньютоновской механике. Слабый принцип эквивалентности: пропорциональность инертной и гравитационной масс. Ньютоновские уравнения гравитационного поля. Принцип дальнего действия.

§ 2 Основные идеи специальной теории относительности (2 ч.)

Определение инерциальных систем координат в СТО. Специальный принцип относительности. Интервал и его инвариантность во всех инерциальных системах координат. Псевдоевклидовость геометрии пространства событий СТО. Метрика Минковского. Преобразования Лоренца. Обзор следствий преобразований Лоренца. Мировая линия частицы. Нулевые (изотропные), пространственноподобные и времениподобные интервалы и геодезические. Световой конус. Абсолютно будущие, абсолютно прошлые и абсолютно удаленные события. 4-скорость частицы и ее связь с трехмерной пространственной скоростью. Тензор энергии-импульса в СТО. Законы сохранения энергии и импульса в СТО.

§ 3 Основные идеи общей теории относительности (2 ч.)

Выделенность гравитации как силы: лифт Эйнштейна. Эйнштейновский принцип эквивалентности. Связь эйнштейновского и слабого принципа эквивалентности. Локально-инерциальные системы координат. Псевдоримановость пространства событий ОТО. Квазидекартовы координаты. Уравнения поля ОТО и принципы их получения. Космологическая постоянная. Координатные условия и их роль в решении уравнений поля. Гармонические системы координат. Движение пробных тел в ОТО: геодезический принцип и его связь с эйнштейновским принципом эквивалентности. Распространение света в ОТО: предел геометрической оптики.

III Постньютоновское приближение ОТО (6.5 ч.)

§ 1 Уравнения поля, уравнения геодезических и метрика в постньютоновском приближении (2.5 ч.)

Постньютоновская аппроксимационная схема: малые параметры, область применимости. Уравнения поля в приближении, линейном по негалилеевским компонентам метрики. Оценки порядка малости негалилеевской части метрики. Уравнения неизотропных геодезических в слабом поле. Символы Кристоффеля второго рода для слабого поля. Ньютоновское приближение ОТО: метрика и уравнения движения пробной частицы. Метрика в постньютоновском приближении. Постньютоновские потенциалы гравитационного поля, вектор-потенциал, скаляр-потенциал.

§ 2 Движение пробной частицы в постньютоновском приближении (0.75 ч.)

Метрика одного сферически симметричного статического тела. Постньютоновские уравнения движения пробной частицы в поле сферически симметричного тела. Решение в оскулирующих элементах. Релятивистский эффект в долготе перицентра.

§ 3 Распространения света в постньютоновском приближении (0.75 ч.)

Уравнения изотропных геодезических в слабом поле. Постньютоновские уравнения распространения света в поле сферически симметричного тела. Общая схема решения уравнения распространения света. Задача с начальными условиями. Релятивистское отклонения света.

Задача с граничными условиями. Эффект Шапиро (запаздывание сигнала, распространяющегося в гравитационном поле).

§ 4 Наблюдения в ОТО (2.5 ч.)

Измеряемые и неизмеряемые (координатно-зависимые) величины. Моделирование наблюдений в СТО. Пробные наблюдатели. Собственное время. Локальная система координат наблюдателя: тетрадный формализм. Монада, триада, тетрада. Физический смысл тетрады. Правила “поднятия” и “опускания” тетрадных индексов. Уравнения, определяющие векторы тетрады. Использование тетрады для вычисления измеряемого (собственного) времени и измеряемого расстояния между двумя бесконечно близкими событиями. Компоненты тетрады в постньютоновском приближении. Собственное (измеряемое) направление распространения света и его связь с координатной скоростью света в точке наблюдения. Закон изменения векторов тетрады при движении наблюдателя. Тетрада как репер локальной системы координат наблюдателя. Динамически и кинематически невращающиеся тетрады. Перенос Ферми-Уолкера. Релятивистские прецессии: геодезическая прецессия, прецессия Лензе-Тирринга, прецессия Томаса. Численные оценки величин релятивистских прецессий.

IV Точные решения уравнений Эйнштейна (1.5 ч.)

§ 1 Решение Шварцшильда (1.2 ч.)

Задача одного притягивающего центра в ОТО. Метрика Шварцшильда: набросок вывода метрики, метрика в стандартных координатах Шварцшильда, метрика в гармонических координатах. Физическая эквивалентность метрик в различных системах координат. Единственность метрики Шварцшильда как сферически симметричного решения уравнений поля ОТО. Движение пробных частиц и света в поле Шварцшильда: точное уравнение траектории. Обзор типов траекторий пробных частиц. Обзор типов траекторий света. Горизонт. Черные дыры.

§ 2 Метрика Керра и другие решения (0.3 ч.)

Вид метрики Керра в координатах Бойера-Линдквиста. Единственность решения Керра. Решения Рейсснера-Нордстрема и Керра-Ньюмана.

V Современные принципы моделирования астрономических наблюдений в ОТО (8 ч.)

§ 1 Общая методика моделирования астрономических наблюдений в ОТО (1 ч.)

Составные части типичного астрономического явления и его процесса его наблюдения. Моделирование движения наблюдателя, объекта наблюдений и электромагнитного сигнала между объектом наблюдения и наблюдателем. Моделирование процесса наблюдения. Сопоставление релятивистской модели с наблюдениями: параметры модели и их зависимость от системы координат. Необходимость введения нескольких пространственно-временных систем координат.

§ 2 Иерархия релятивистских астрономических систем координат (1.5 ч.)

Глобальная система координат (BRS): структура метрического тензора, применения BRS. Региональная геоцентрическая система координат (GRS): структура метрического тензора и преобразования BRS–GRS, основные свойства GRS и ее применения. Локальные системы координат (ORS), их основные свойства и применения. Динамически и кинематически невращающиеся системы координат. Астрономические системы отсчета как результат материализации релятивистских астрономических систем координат.

§ 3 Система релятивистских астрономических шкал времени (2.5 ч.)

Идеализированные и реальные шкалы времени. Шкалы TCG и TCB как шкалы координатного времени BRS и GRS. Интерпретация шкал TCG и TCB как собственного времени определенных фиктивных наблюдателей. Преобразование TCG–TCB и его структура. Проблема среднего хода шкал времени: шкала TT (TDT) и TAI как ее практическая реализация. Связь собственного времени наземного наблюдателя со шкалой TT. Шкала TDB. Переопределение пространственных координат BRS и GRS в соответствии со шкалами TDB и TT соответственно: проблема единиц измерения. Различие численных значений геоцентрической гравитационной постоянной при использовании шкал TCG и TT. Синхронизация удаленных часов в ОТО: абсолютность одновременности событий в ньютоновской механике; относительность одновременности событий в СТО; эйнштейновский алгоритм синхронизации в СТО; концепция координатной синхронизации часов в ОТО; пример: обобщение эйнштейновской процедуры синхронизации на ОТО.

§ 4 Релятивистские возмущения в движении реальных небесных тел (1 ч.)

Условность понятия “релятивистские возмущения”. Релятивистские возмущения в движении больших планет, астероидов и межпланетных станций. Релятивистские возмущения в движении Луны. Релятивистские возмущения в движении ИСЗ.

§ 5 Позиционные наблюдения (1 ч.)

Общая схема релятивистской редукции позиционных наблюдений. Релятивистская абберация. Сравнение с ньютоновской абберацией. Величина релятивистской абберации второго и третьего порядка.

§ 6 Локационные и доплеровские наблюдения (1 ч.)

Общая схема релятивистской редукции локационных наблюдений. Частота с точки зрения ОТО. Общая схема релятивистской редукции доплеровских наблюдений. Релятивистский эффект Доплера.

Рекомендуемая литература

Книги написанные специально для астрономов:

1. V.A. Brumberg (1990) Essential Relativistic Celestial Mechanics, Adam Hilder, Bristol
Наиболее современный курс. Содержит введение в математический аппарат ОТО, и краткое физическое введение в саму теорию относительности. Отдельные главы посвящены релятивистским уравнениям движения тел Солнечной системы, проблемам релятивистской редукции астрономических наблюдений, а также релятивистским эффектам в геодинاميке (шкалы времени, синхронизация часов и т.д.).
2. В.А. Брумберг (1972) Релятивистская небесная механика. Москва, Наука.
Предыдущая версия первой книги. Содержит хорошее введение в саму теорию относительности и ее математический аппарат. Изложение приложений ОТО к астрономическим задачам во многом устарело.
3. M. Soffel (1989) Relativity in Astrometry, Celestial Mechanics and Geodesy. Springer, Berlin
Немного сложна для начинающих. Требуется знания основ теории относительности. Содержит большое количество фактического материала о релятивистских эффектах в различных астрономических задачах.

Некоторые учебники ОТО для физиков:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц (1992) Теория поля. Москва, Наука.
2. С. Вейнберг (1975) Гравитация и космология. Москва, Мир.
3. К.У. Мизнер, К.С. Торн, Дж.А. Уилер (1977) Гравитация. Москва, Мир.
4. К. Уилл (1985) Теория и эксперимент в гравитационной физике. Москва, Атомэнергиздат