

Программа курса “Радиационные процессы в астрофизике”
для студентов-астрофизиков 4 курса (VIII семестр)
Лектор — профессор Д. И. Нагирнер

Глава I. Тормозной и рекомбинационный механизмы

§ 1. Тормозной механизм

1. Постановка задачи. Подход Я. Б. Зельдовича. Мощность излучения и дипольный момент заряда. Переход в систему центра масс. Относительное движение. Невозможность излучения первого порядка при столкновении одинаковых зарядов.

2. Оценка излучаемой энергии. Оценки времени взаимодействия, ускорения и полного излучения при прохождении электрона вблизи иона.

3. Спектр излучения электрона. Спектральная плотность и сечение излучения. Формула Крамерса. Множитель Гаунта.

4. Усреднение по скоростям. Распределение Максвелла. Объемный коэффициент излучения и его усреднение. Сохранение энергии и минимальная скорость электрона. Характерный завал по частоте.

5. Поглощение. Условие детального баланса при ТДР. Коэффициенты тормозного поглощения: зависящий от скорости и средний.

§ 2. Рекомбинационный механизм

1. Сечение рекомбинации. Сохранение энергии при рекомбинации. Связь излучаемой частоты и номера уровня, на который происходит рекомбинация. Сечение рекомбинации.

2. Излучательная способность. Коэффициент излучения максвелловскими электронами. Коэффициент рекомбинации.

3. Коэффициент ионизации. Условие детального баланса при рекомбинации и ионизации. Коэффициент поглощения, две формы представления.

4. Рекомбинационные радиолнии (РРЛ). Высокие уровни атомов и среднее расстояние электронов от ядра. Соотношение Инглиса—Теллера. Частоты рекомбинационных линий водорода. Уравнение переноса излучения в линии $H_{i+1\alpha}$. Мензеловские множители. Возможность мазерного усиления.

Глава 2. Магнито-тормозной механизм

§ 1. Геометрия и терминология

1. Движение и излучение заряда. Предположения относительно движения заряда в магнитном поле.

2. Системы отсчета. Четыре инерциальных системы отсчета, связанных с вращающимся в магнитном поле зарядом, и его собственная система.

3. Инварианты. Напряженность магнитного поля, циклотронная частота, радиус окружности вращения заряда, собственное время. Преобразование Лоренца, продольное преобразование.

4. Лабораторная система. Трехмерные и четырехмерные радиус-вектор, скорость и ускорение заряда, вращающегося по окружности. Связь времени в системе заряда с собственным временем. Инвариантные величины.

5. Системы отсчета поля. Продольная скорость заряда. Трехмерные и четырехмерные радиус-вектор, скорость и ускорение заряда, движущегося по винтовой линии. Связь лоренцевских множителей в трех системах. Питч-угол и проекции скорости.

6. Полное излучение и классификация. Мощность магнито-тормозного излучения. Предельные случаи соотношения между скоростью заряда и скоростью света. Циклотронное, синхротронное, гирсинхротронное и релятивистское дипольное излучение.

§ 2. Угловая зависимость излучения одиночного заряда в волновой зоне

1. Мгновенные напряженность и интенсивность. Векторный потенциал Лиенара—Вихерта и выражение через него напряженностей электрического и магнитного полей. Связь между временем наблюдения и временем влияния и их взаимными производными. Градиент времени влияния и градиент по координатам наблюдения. Мощности излучения по отношению к наблюдателю и к заряду.

2. Интенсивность магнито-тормозного излучения. Зависимость от направления мощности излучения заряда, движущегося по винтовой линии.

3. Предельные случаи. Нерелятивистский и ультрарелятивистский пределы. Излучение вблизи направления питч-угла. Синхротронное и релятивистское дипольное излучение.

4. Интегрирование по периоду. Два стандартных интеграла. Магнито-тормозное излучение за период. Нерелятивистский предел.

5. Релятивистский предел. Оценки величин, характеризующих излучение вблизи питч-угла. Синхротронное и релятивистское дипольное излучение.

6. Доказательство возможности пренебречь потерей энергии электроном за период излучения. Отношение излучаемой энергии к кинетической энергии электрона. Оценка величины магнитного поля, при котором это отношение равно единице.

§ 3. Спектр магнито-тормозного излучения в волновой зоне

1. Характер спектра при периодическом движении заряда. Совпадение периодов для заряда и наблюдателя. Совпадение частоты вращения заряда и наименьшей частоты излучения. Разложение электрической напряженности в ряд Фурье. Соотношение Парсевала.

2. Коэффициент разложения. Выражение его через безразмерный интеграл.

3. Движение по окружности. Вычисление интеграла для случая движения заряда по окружности. Функции Бесселя и их производные.

4. Формула Шотта. Напряженность поля и мощность излучения в линиях вращающегося по окружности заряда.

5. Поляризация в линиях. Поляризационная матрица и параметры Стокса в линиях.

6. Полное излучение в линиях. Мощность излучения заряда в линии во всех направлениях и линейная поляризация этого излучения. Нерелятивистский предел.

7. Импульс фотона. Эффект Доплера и абберация при переходе из системы заряда в систему поля.

8. Спектр в системах поля. Релятивистское обобщение величин, характеризующих излучение заряда на случай его движения по винтовой линии. Излучаемые импульс и энергия. Связь частоты вращения заряда и частот излучаемых им линий.

§ 4. Спектр синхротронного излучения

1. Функции Бесселя. Определение функций Бесселя первого рода и модифицированных функций Бесселя. Функция Макдональда. Уравнения, определяющие эти функции. Поведение при малых аргументах. Производная от функции Макдональда.

2. Интегральные представления. Представления в виде интегралов функций $J_n(z)$, $I_n(z)$ и $K_\nu(z)$. Асимптотика функций Макдональда.

3. Приближение ВКБ для $J_\nu(z)$. Решение уравнения второго порядка методом ВКБ. Применение его к уравнению Бесселя. Недостаток метода.

4. Формулы Лангера. Замены переменных в уравнении Бесселя и приближение вблизи точки поворота для случая, когда аргумент не превосходит порядка. Асимптотические формулы для функции Бесселя и ее производной.

5. Направленное излучение в линиях. Излучение вблизи плоскости вращения заряда. Предельные случаи соотношения между номером линии и лоренцевским множителем. Характер спектра циклотронного и синхротронного излучения.

6. Полное излучение в линиях. Применение формул Лангера к оценке внеинтегрального и интегрального слагаемых в формуле для полного излучения в линии. Выражение интенсивности излучения в системе заряда через универсальную функцию.

7. Излучение в линиях в системе поля. Синхротронное излучение в линиях при закрепленной частоте. Асимптотика формул для направленного и полного излучения.

8. Усреднение по распределению энергий электронов. Степенное распределение электронов по энергиям. Замена переменных и изменение порядка интегрирования в интеграле, представляющем среднюю интенсивность излучения по ансамблю электронов. Выражение средней энергии через гамма-функцию.

9. Усреднение по направлениям поля. Хаотический характер распределения направлений магнитного поля вдоль луча зрения. Выражение средней степени синуса через гамма-функцию. Связь показателей степени в распределении энергий электронов и в частотной зависимости их излучения.

Глава 3. Комптоновское рассеяние

§ 1. Описание комптоновского рассеяния

1. Комптоновское рассеяние и изменение энергии фотона. Законы сохранения при комптоновском рассеянии и их следствие. Случай неподвижного электрона до рассеяния. Эффект Комптона и “обратный эффект”.

2. Эффективность комптоновского рассеяния. Уравнение переноса при действии тормозного механизма и комптоновского рассеяния. Отношение коэффициентов тормозного поглощения и комптоновского ослабления и его безразмерный вид. Условия преобладания рассеяния.

3. Сечение комптоновского рассеяния. Дифференциальное и полное сечения Клейна—Нишины—Тамма. Профиль полного инвариантного сечения.

§ 2. Кинетическое уравнение для комптоновского рассеяния и его частные случаи

1. Релятивистские обозначения. Релятивистские инварианты: элементы объема в импульсном пространстве фотонов и электронов, левая часть кинетического уравнения, функция распределения электронов и средние числа заполнения фотонных состояний.

2. Релятивистское кинетическое уравнение комптоновского рассеяния. Уравнение в произвольной инерциальной системе и в сопутствующей электронному газу. Смысл входящих в уравнение слагаемых. Интеграл столкновений. Безразмерные обозначения.

3. Плоская атмосфера тепловых электронов. Конкретизация общего уравнения для плоской среды и максвелловских электронов. Функция перераспределения по частоте и направлениям. Коэффициент ослабления.

4. Однородное бесконечное пространство. Усреднение кинетического уравнения по направлениям. Сохранение числа фотонов.

5. Нерелятивистский предел. Случай почти нерелятивистских электронов и мягких фотонов. Предельный переход в распределении Максвелла и в кинетическом уравнении. Уравнение типа Фоккера—Планка.

6. Комптонизация. Смысл термина. Эволюция малой частоты фотона при комптоновском рассеянии горячим электронным газом.

§ 4. Решения кинетических уравнений

1. Уравнение Компанейца и его свойства. Размерный и безразмерный вид уравнения. Смысл отдельных слагаемых. Сохранение полного числа фотонов.

2. Линейное уравнение и функция Грина. Определение функции Грина, уравнение и начальное условие для нее. Предельная форма функции и общего решения.

3. Диффузионное решение. Преобразование диффузионного уравнения к уравнению диффузии и его решение.

4. Решение стационарного линейного уравнения. Решения однородного уравнения и функция Грина неоднородного уравнения. Случай степенного источника.

5. Решение недиффузионного уравнения. Уравнения для характеристик и общее решение. Предел больших чисел заполнения. Перехлест спектра и его истолкование.

6. Эволюция однородного поля излучения. Примеры расчета. Случаи наличия и отсутствия предельных стационарных распределений.

§ 5. Астрофизические объекты с большой ролью комптоновского рассеяния

1. Джеты из активных ядер галактик. Причина активности ядер. Струи и сгустки, выбрасываемые из ядер. Синхротомптонский механизм свечения. Механизмы подкачки энергии.

2. Нейтронные звезды и черные дыры в двойных системах. Перетекание и аккреция вещества. Механизмы излучения — источники фотонов. Комптонизация первичных фотонов. Миниквазары.

3. Горячие короны аккреционных дисков. Температуры дисков и их корон. Области спектра их излучения. Взаимное влияние диска и короны.

4. Реликтовое излучение. Эволюция излучения в ходе расширения Вселенной. Остаточные искажения РИ и его анизотропия. Поляризация.

5. Горячий газ в скоплениях галактик. Сущность эффекта Сюняева—Зельдовича.

6. Другие объекты.

Глава 4. Черенковское и переходное излучение

§ 1. Движение заряда в диэлектрике и его наблюдение

1. Заряд в диэлектрике. Плотности заряда и тока точечного заряда в диэлектрике. Показатель преломления и соотношение скоростей заряда и света в среде. Природа излучения.

2. Потенциалы. Волновые уравнения и их решения. Запаздывающие потенциалы, соотношение времен наблюдения и влияния. Конкретизация для точечного заряда. Выражение векторного потенциала через скалярный.

3. Моменты влияния. Решения уравнения, связывающего времена наблюдения и влияния. Случаи скорости заряда, большей и меньшей скорости света в среде.

4. Конус Черенкова. Условие вещественности потенциалов. Угол и конус Черенкова. Два момента влияния.

§ 2. Потенциалы заряда в диэлектрике

1. Проекция скорости на направление излучения. Две проекции скорости заряда на направление на наблюдателя, их знаки и другие свойства. Сферы влияния. Картина прохождения заряда через сферы влияния.
2. Нахождение потенциалов. Время влияния при прохождении неточечного заряда через сферы влияния. Выражения для потенциалов.
3. Производные от потенциалов. Градиенты и производные по времени от потенциалов. Условие Лоренца.

§ 3. Излучение Черенкова и его спектр

1. Поле и излучение. Напряженности электрического и магнитного полей в векторной форме и в координатах. Вектор Пойнтинга.
2. Спектр черенковского излучения. Преобразование Фурье от потенциалов и напряженностей. Выражения через функцию Макдональда и через интегралы с весовыми функциями.
3. Излучаемая мощность. Вычисление интенсивности излучения через потери энергии зарядом. Расходимость интеграла для нее и его регуляризация. Формула Тамма—Франка.

§ 4. Переходное излучение

1. Природа излучения. Различные случаи излучения заряда, движущегося с постоянной скоростью в среде. Случай двух однородных полупространств. Плотности заряда и тока.
2. Основные уравнения. Уравнения Максвелла и уравнение для электрической напряженности.
3. Преобразования Фурье. Разложения в интеграл Фурье плотности заряда и электрической напряженности. Преобразование плотности заряда и уравнение для нормальной компоненты напряженности. Условия непрерывности на границе.
4. Решение уравнений. Волна, вынужденная зарядом, и свободные волны в двух направлениях.
5. Амплитуды волн. Шивка решений и определение амплитуд волн из граничных условий.
6. Предельные случаи. Амплитуды волн в случае нерелятивистского заряда. Предел больших частот, ультрарелятивистских скоростей и малых углов.

Глава 5. Двухфотонные процессы с электрон-позитронными парами

§ 1. Описание процессов

1. Законы сохранения. Размерные и безразмерные импульсы частиц и фотонов. Четыре закона сохранения, их альтернативные формулировки. Следствия законов сохранения.
2. Скалярные произведения. Обозначения скалярных произведений импульсов частиц и фотонов. Суммы импульсов. Ограничения на импульсы фотонов.
3. Сечения процессов. Дифференциальные и полные сечения аннигиляции и рождения пары.
4. Система центра масс. Импульсы частиц и фотонов в системе.

§ 2. Кинетическое уравнение для фотонов при процессах с парами

1. Функции распределения частиц и фотонов. Релятивистская квантовая система единиц.
2. Кинетическое уравнение. Размерная и безразмерная формулировка. Уравнение в виде уравнения переноса излучения.
3. Коэффициенты уравнения переноса. Коэффициенты поглощения и излучения. Выражения их через сечения процессов.

Литература

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Наука, 1966, 688 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. Наука, М., 1988, 512 с.
3. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики. М., Наука, 1985, 504 с.
4. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. Ред. Р. А. Сюняев. М., Советская энциклопедия, 1986, 784 с.
5. Rybicki G. B., Lightman A. P. Radiative processes in astrophysics. Wiley-Interscience. John Wiley & Sons. N. Y. 1979. 382 p.
6. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. М., Наука, 1987, 488 с.
7. Нагирнер Д. И. Комптоновское рассеяние в астрофизических объектах. Изд-во СПбГУ. 2001.
8. Нагирнер Д. И. Механизмы излучения в астрофизике. Лекции. Сайт НИАИ. 2002.