

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»**

Кафедра ФИЗИКИ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Основной образовательной программы по направлению подготовки
010900.68 – Прикладные математика и физика

Благовещенск 2012

УМКД разработан профессором кафедры ФИЗИКИ Ваниной Еленой Александровной

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры ФИЗИКИ

Протокол заседания кафедры от «__» _____ 2012 г. № _____

Зав. кафедрой _____ / _____ /
(подпись) (И.О. Фамилия)

УТВЕРЖДЕН

Протокол заседания УМС направления подготовки 010900.68 – «Прикладные математика и физика»

от «_____» _____ 201__ г. № _____

Председатель УМСМ _____ / _____ /
(подпись) (И.О. Фамилия)

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины «Синхротронное излучение»: сформировать теоретические представления о синхротронном излучении как физическом явлении, а также представления о современных методах анализа материалов, с использованием синхротронного излучения; ознакомить с современными синхротронными лучевыми технологиями

Задачи дисциплины:

1. Сформировать минимум физических и системно-теоретических знаний, позволяющих понимать физическую природу, механизмы и закономерности синхротронного излучения и физических основ его применения.
2. Сформировать знания об устройствах и характеристиках оборудования каналов синхротронного излучения

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:

Дисциплина «Синхротронное излучение» входит в вариативную часть профессионального цикла (М2, В.ДВ.4).

Для освоения дисциплины необходимо знать:

- 1) статистическую физику;
- 2) общую физику;
- 3) квантовую теорию;

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) **Знать:**

теоретические основы, основные понятия, законы и модели синхротронного излучения;

2) **Уметь:**

понимать, излагать и критически анализировать базовую общефизическую информацию;

понимать физическую природу, механизмы и закономерности синхротронного излучения и физических основ его применения;

3) **Владеть:**

методами обработки и анализа экспериментальной и теоретической физической информации.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Общекультурные компетенции (ОК):

Компетенция системного аналитического мышления: способность использовать на практике углубленные фундаментальные знания, полученные в области естественных и гуманитарных наук, обладать научным мировоззрением (ОК – 1);

компетенция креативности: способность ставить, формулировать и решать задачи, уметь системно анализировать научные проблемы, генерировать новые идеи и создавать новое знание (ОК – 2);

компетенция самообразования и профессиональной мобильности: способность самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности знания и умения, в том числе в новых областях (ОК-3);

компетенция самообразования и профессиональной мобильности: способность формулировать устно и письменно свою точку зрения, владеть навыками ведения научной и общекультурной дискуссии на русском и английском языках (ОК – 4);

компетенция командной работы: способность работать в коллективе и применять навыки эффективной организации труда и командной работы (ОК – 5).

Профессиональные компетенции (ПК):

компетенция профессиональной аналитической деятельности: способность применять в своей профессиональной деятельности углубленные знания, полученные в соответствии с профессиональной направленностью (ПК - 1);

компетенция профессиональной научной деятельности: способность ставить задачи теоретических и (или) экспериментальных научных исследований и решать их с помощью соответствующего физико-математического аппарата, современной аппаратуры и информационных технологий (ПК – 2);

компетенция профессионального развития: способность самостоятельно осваивать новые дисциплины и методы исследования (ПК – 3);

компетенция профессионального владения информационно-коммуникационными технологиями: способность применять современные методы анализа, представления и передачи информации, использовать пакеты прикладных программ по профилю подготовки (ПК – 4);

компетенция профессионального использования технических средств: способность профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области в соответствии с целями программы специализированной подготовки магистра (ПК – 5);

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

«Синхротронное излучение»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 час.

Семестр 3

| Раздел дисциплины | Виды учебной работы | | | | Формы текущего контроля |
|--|---------------------|-----------------------------|----------------------------|------------|--|
| | Лекции (час.) | Практические занятия (час.) | Лабораторные работы (час.) | СРС (час.) | |
| Введение в предмет | 2 | | | | Контроль за посещением аудиторных занятий. |
| Основы теории синхротронного излучения | 14 | 4 | | 6 | Контроль за посещением аудиторных занятий. |
| Источники синхротронного излучения | 6 | 4 | | 6 | Контроль за |

| | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|--|---|--|
| | | | | | посещением аудиторных занятий. Расчетно-графическая работа. |
| Рентгеноструктурный анализ на СИ. | 6 | 4 | | 6 | Контроль за посещением аудиторных занятий. Составление конспектов по самостоятельной работе |
| Спектроскопия на источниках СИ | 6 | 4 | | 6 | Контроль за посещением аудиторных занятий. Составление конспектов по самостоятельной работе |
| Лазеры на свободных электронах | 2 | 2 | | 6 | Контроль за посещением аудиторных занятий. |
| Зачет | | | | 6 | Подготовка к зачету |

5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1. ЛЕКЦИИ

Введение. Цели и задачи курса. История открытия синхротронного излучения. Классификация электромагнитного излучения и рентгеновские лучи в этой классификации. Свойства рентгеновских лучей. Первые эксперименты.

Тема 1. Основы теории синхротронного излучения. *Характеристики электромагнитного излучения. Основы теории электромагнитного излучения.*

Уравнение переноса излучения. Спектр излучения. Поляризация излучения. Излучение движущихся зарядов. Излучение нерелятивистских частиц. Тормозное излучение. Реакция излучения. Синхротронное излучение заряда в вакууме. Синхротронное излучение системы электронов. Поляризация синхротронного излучения. Циклотронное излучение. Излучение в периодических магнитных полях. Вигглеры и ондуляторы. Лазеры на свободных электронах.

Тема 2. Источники синхротронного излучения. Синхротроны и накопители. Специализированные источники синхротронного излучения. Конструкции каналов

СИ. Организация работ на каналах СИ. Оптика каналов СИ. Монохроматоры и дифрактометры. Источники 3 поколения. Источники 4 поколения. Компактные источники синхротронного излучения.

Тема 3. Рентгеноструктурный анализ на СИ. Суть рентгеноструктурного анализа. Применение СИ в рентгеноструктурном анализе монокристаллов. Рентгеноструктурный анализ с разрешением по времени. Дифракция порошков

Тема 4. Спектроскопия на источниках СИ Спектральные методы с использованием СИ. Спектроскопия с временным разрешением. Фотоэлектронная спектроскопия. Рентгеновская абсорбционная спектроскопия (XAFS-спектроскопия)

Тема 5. Лазеры на свободных электронах. Принципы работы ЛСЭ. Когерентные источники рентгеновского излучения.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

| | Раздел | Форма самостоятельной работы | Трудоемкость в часах |
|----|---|---|----------------------|
| 1 | Тема1. «Основы теории синхротронного излучения» | Изучение материалов лекций. Составление конспектов по темам самостоятельной работы. | 6 |
| 2 | Тема 2. «Источники синхротронного излучения.» | Изучение лекционных материалов. Выполнение расчетно-графической работы. Подготовка к практическим занятиям. | 6 |
| 3 | Тема 3. «Рентгеноструктурный анализ на СИ.» | Изучение материалов лекций. Составление конспектов по темам самостоятельной работы. | 6 |
| 4 | Тема 4. «Спектроскопия на источниках СИ» | Изучение лекционных материалов. Подготовка к практическим занятиям. Составление конспектов по самостоятельной работе. | 6 |
| 5 | Тема 5. «Лазеры на свободных электронах». | Изучение материалов лекций. Составление конспектов по темам самостоятельной работы. | 6 |
| 12 | Зачет | Подготовка к зачету | 6 |

7. МАТРИЦА КОМПЕТЕНЦИЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ.

Таблица компетенций

| Темы, | Коли | КОМПЕТЕНЦИИ |
|-------|------|-------------|
|-------|------|-------------|

| РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИН Ы | ЧЕСТ ВО ЧАСО В | ОК-1 | ОК-2 | ОК -3 | ПК-1 | ПК-2 | ПК-3 | ПК-4 | ПК-5 | ОК-4 | Σ ОБЩЕ Е КОЛИ ЧЕСТВ О КОМП ЕТЕНЦ ИЙ |
|--|-------------------------|------|------|----------|------|------|------|------|------|------|---|
| Введение. | 2 | + | + | + | + | + | | | | + | 6 |
| Основы теории синхротронн ого излучения» | 14 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | 9 |
| Источники синхротронн ого излучения.» | 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | 9 |
| Рентгеностр уктурный анализ на СИ | 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | 9 |
| Спектроскоп ия на источниках СИ | 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | 9 |
| «Лазеры на свободных электронах» | 2 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | 9 |

8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При изучении дисциплины «Синхротронное излучение» применяются следующие информационные технологии: интерактивное обучение (моделирующие компьютерные программы, виртуальные учебные комплексы), мультимедийное обучение (презентации, моделирование и симуляция процессов и объектов). Удельный вес занятий, проводимых в интерактивной форме, составляет 50% (18 ч.).

Для усвоения дисциплины используются электронные базы учебно-методических ресурсов, электронные библиотеки.

9. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

9.1. Вопросы к зачету

Основы синхротронного излучения

1. Интенсивность излучения, поток излучения, давление излучения.
2. Уравнения переноса для вакуума и среды.
3. Поляризация излучения. Параметры Стокса.
4. Излучение движущихся зарядов. Вычисление скалярного потенциала.
5. Излучение нерелятивистских частиц. Вычисление напряженностей электрического и магнитных полей. Энергия излучаемая в единицу времени.
6. Уравнение движения электрона в однородном магнитном поле. Мощность синхротронного излучения. Вычисление спектра излучения.
7. Синхротронное излучение ансамбля электронов. Спектр излучения, коэффициент поглощения.
8. Поляризация синхротронного излучения.

Источники синхротронного излучения

9. Устройство синхротрона
10. Накопительные кольца
11. Источники СИ 3 поколения
12. Источники 4 поколения
13. Вигглеры и ондуляторы. Свойства ондуляторного излучения.

Рентгеноструктурный анализ на СИ

14. Суть рентгеноструктурного анализа с использованием СИ
15. Применение СИ в рентгеноструктурном анализе монокристаллов

Спектроскопия на источниках СИ

16. Принципы XAFS-спектроскопии
17. Характеристика методов спектроскопии с использованием методов СИ

9.2. Виды контроля

Текущий контроль за аудиторной и самостоятельной работой обучаемых осуществляется во время проведения лекционных занятий посредством устного опроса по контрольным вопросам соответствующего раздела. Промежуточный контроль осуществляется два раза в семестр в виде анализа итоговых отчетов на аттестационные вопросы. Итоговый контроль осуществляется после успешного прохождения магистрантами текущего и промежуточного контроля в виде зачета.

9.3. Требования к знаниям студентов, предъявляемые на зачете

Зачет сдается в конце семестра. Форма сдачи зачета – устная. В предлагаемый билет входят два вопроса: основной и дополнительный. Студент должен дать развернутый ответ на основной вопрос, и краткий – на дополнительный. Развернутый ответ предполагает полное знание теории по данной части курса, свободную ориентацию в материале, краткий ответ – основных теоретических моментов: понятий и терминологии. При выполнении указанных требований ставится отметка «зачтено».

10 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

10.1. Перечень обязательной (основной) литературы

а) основная литература:

1. М. И. Пергамент. Методы исследований в экспериментальной физике. Серия: Физтеховский учебник. Издательство: Интеллект, 2010 г. 304 с.

б) Перечень дополнительной литературы

1. Ишханов Б.С. Нуклеосинтез во Вселенной: учеб. пособие: рек. Мин. Обр. РФ/ Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, И.А. Тутынь. - М.: Либроком, 2009. – 202 с.

2. Мухин, Константин Никифорович. Экспериментальная ядерная физика [Текст] : учеб. : в 3 т. - (Классическая учебная литература по физике). Т. 2: Физика ядерных реакций. - 2009. - 319 с.
3. Астапенко, В.А. Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами [Текст] : учеб. пособие / В. А. Астапенко. - Долгопрудный: Интеллект, 2010. - 493 с.
4. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры вещества. / Под редакцией Л.А. Асланова.– М, ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 672с. (ЭБС ун. биб-ка online)

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

| № | Наименование ресурса | Краткая характеристика |
|---|---|---|
| 1 | http://nuclphys.sinp.msu.ru | Ядерная физика в интернете. Справочные материалы, учебные материалы курса "Физика атомного ядра и частиц", материалы спецкурсов |
| 2 | http://e.lanbook.com/ | Электронная библиотечная система «Лань» обеспечивает доступом к научной и учебной литературе. |
| 3 | http://www.icdd.com/ | Программа для обучения работе с базой данных PDF-2 ICDD |
| 4 | http://www.iqlib.ru | Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам и отраслям знания. |
| 5 | http://window.edu.ru/ | Единое окно доступа к образовательным ресурсам/ каталог/ профессиональное образование |

г) периодические издания

1. Доклады Академии наук.
2. Известия вузов. Физика.
3. Вестник Амурского государственного университета.

11. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| № п/п | Наименование лабораторий, ауд. | Основное оборудование |
|-------|-----------------------------------|--|
| 1. | Корпус № 1, ауд. 407 (лекционная) | Комплект ТСО Интерактивная доска Оверхед –проектор Gaha 240/3 02г. Видеопроектор Epson Мультимедийный проектор-03г. Ноутбук Пентиум 100-03г. |

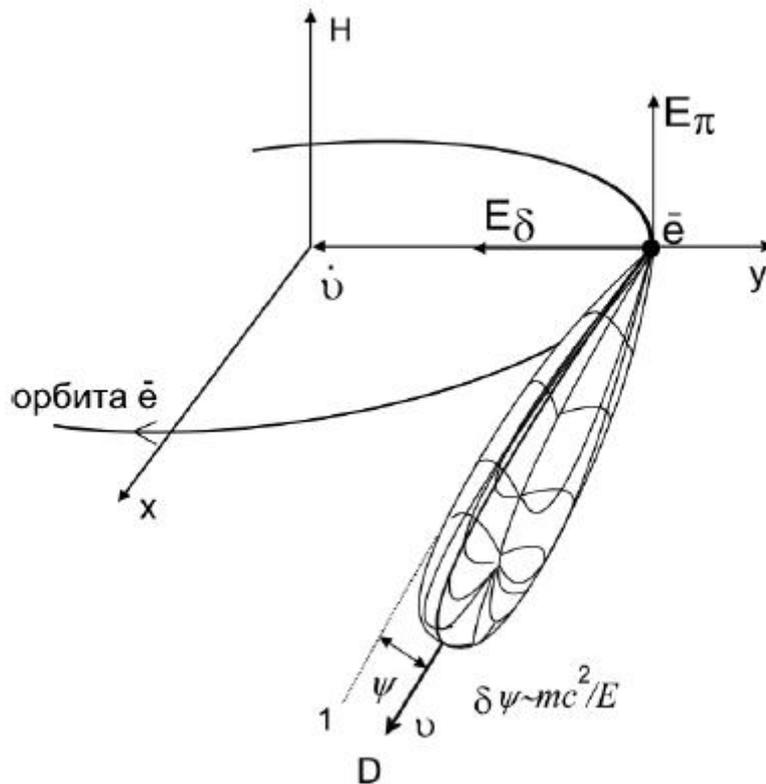
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИЙ КУРСА «СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ»

Введение.

Синхротронное излучение (СИ) – это электромагнитное излучение релятивистских, т.е. движущихся со скоростью близкой к скорости света электронов, ускоряемых в циклических ускорителях. В последних используется движение заряда по окружности в однородном магнитном поле. При таком движении электрон становится источником мощного электромагнитного излучения. При развитии ускорительной техники (бетатронов) возникла проблема ограничения энергии электронов, достижимой в бетатроне. В 1944 году Д.Д. Иваненко и И.Я. Померанчук показали, что потери на магнитотормозное излучение в циклическом ускорителе пропорциональны четвертой степени энергии, до которой ускорены электроны. При этом приобретаемая электроном энергия становится сравнимой с мощностью радиационных потерь. Явление излучения электромагнитной волны релятивистским электроном получило название – «светящийся электрон». Визуально синхротронное излучение наблюдалось в 1947 году в лаборатории, руководимой Поллоком, на одном из первых синхротронов. Наблюдал его впервые Флойд Хабер как голубое свечение на орбите электрона. Излучение получило название синхротронного. Вначале СИ рассматривалось как вредное, но затем стало применяться для исследования вещества. Сегодня синхротронное излучение применяется в радиоастрономии, медицине, археологии и т.д. Наиболее важными волновыми свойствами рентгеновских лучей являются дифракция и отражение, а также сопровождающая эти явления поляризация. Корпускулярные свойства заключаются в способности генерировать новые фотоны при столкновении рентгеновских фотонов с веществом (флуоресценция), изменять свою энергию в результате эффекта Комптона и поглощаться при взаимодействии с веществом. Рентгеновские лучи представляются потоком фотонов, которые характеризуются энергией, импульсом и спином.

Глава 1. Основы синхротронного излучения.

Основной характеристикой излучения следует считать его интенсивность. В общем случае она зависит от координат точки наблюдения, времени, направления излучения, его частоты и поляризации. Кроме того, излучение характеризуется потоком излучения и давлением. Электромагнитное излучение, несущее в себе переменные электрические и магнитные поля, может быть описано уравнениями Максвелла. Плотность энергии электромагнитного поля квадратично зависит от напряженностей электрического и магнитных полей. Поток вектора электромагнитной энергии выражается вектором Умова-Пойтинга. На практике используются усредненные по времени величины. Спектр излучения (распределение интенсивности по частоте) зависит от переменности электрического поля по времени. Для вычисления спектра излучения необходимо знать поле в течение длительного промежутка времени, тогда можно определить спектр с определенным разрешением по частоте. Величины, характеризующие поле и излучение, определяются Фурье-преобразованием от величин, зависящих от времени. Синхротронное излучение обладает такими свойствами, что при определенных углах можно наблюдать циркулярную или линейную поляризацию.



Источник: Яловега Г.Э., Родина И.С. Солдатов А.В. Методические указания по курсу синхротронное излучение: методы исследования вещества. Часть 1. Классическая теория синхротронного излучения. Изд-во РГУ: г. Ростов-на-Дону, 2004. – с. 14.

Рис.1 Схема расположения векторов E_π и E_σ компонент линейной поляризации и распределения излучения релятивистского электрона, движущегося по круговой орбите: 1 – направление излучения. D – точка наблюдения.

Экспериментальные исследования показали, что синхротронное излучение почти полностью линейно поляризовано в плоскости орбиты (в хорошем согласии с теорией).

При изучении излучения движущихся зарядов вдоль траектории $r = r_0(t)$ со скоростью $u(t) = dr_0(t)/dt$ плотности зарядов и токов можно записать через δ -функции и получить запаздывающие скалярный и векторный потенциалы в форме потенциалов Ленарда-Вихерта. Через известные выражения находят выражения для напряженностей электрического и магнитных полей. А также энергия и мощность излучения. Следует отметить, что заряды излучают только в случае ускоренного движения

При рассмотрении излучения частицы, движущейся со скоростью много меньшей, чем скорость света, следует рассматривать «дальнюю» зону ($R \gg \lambda c/u$), где доминирует поле излучения. Через найденные напряженности электрического и магнитного полей, можно найти вектор Пойтинга и формулу Лармора:

$$P = \frac{2q^2 (du/dt)^2}{3c^3} \text{ (эрг/сек)}$$

Из этого выражения видно, что излучаемая энергия пропорциональна квадратам заряда и ускорения. Геометрически излучение распространяется в направлении перпендикулярном ускорению, кроме того, вектор E_{rad} лежит в плоскости $(du/dt, n)$ и излучение линейно поляризовано.

Тормозное излучение возникает из-за изменения скорости свободного электрона в кулоновском поле ядра. Захвата электрона не происходит, поэтому оно еще называется свободно-свободным. При таком рассеянии электрон переходит с одной гиперболической орбиты на другую. Для нерелятивистского электрона (в классическом подходе) движущемся по прямой траектории в кулоновском поле ядра вторая производная дипольного момента электрона $\mathbf{d} = -e\mathbf{R}$ равна

$$\frac{d^2 \mathbf{d}}{dt^2} = -e \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

После Фурье-преобразования этого уравнения имеем:

$$\hat{\mathbf{d}}(\omega) \sim \begin{cases} \frac{e\Delta\mathbf{v}}{(2\pi\omega^2)} & \omega\tau \ll 1 \\ 0 & \omega\tau \gg 1 \end{cases}$$

Здесь $\tau \sim b/v$ время столкновения с ионом, $\Delta\mathbf{v}$ - изменение скорости электрона, b - кратчайшее расстояние от иона до траектории электрона.

Можно считать, что изменение скорости происходит преимущественно перпендикулярно пути и равно

$$|\Delta\mathbf{v}| = \frac{2Ze^2}{mbv}$$

тогда изменение энергии на единичный интервал частот равно

$$\frac{dW(b)}{d\omega} = \begin{cases} \frac{8Z^2 e^6}{3\pi c^3 m^2 v^2 b^2} & b \ll v/\omega \\ 0 & b \gg v/\omega \end{cases}$$

Полная энергия, излучаемая в единицу времени в единичном объеме в единичном интервале частот определяется выражением

$$\frac{dW}{d\omega dV dt} = \frac{16e^6}{3c^3 m^2 v} n_e n_i Z^2 \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}$$

где n_i - концентрация ионов, n_e - концентрация электронов, а элемент площади вокруг одного иона $dA = 2\pi b db$, кроме того, должно выполняться условие $b \ll v/\omega$.

Если электрон релятивистский, но выполняется условие $h\nu \ll mc^2$, выражение для испускаемой мощности будет иметь вид

$$\frac{dW}{d\omega dV dt} \sim \frac{16Z^2 e^6 n_e n_i}{3c^4 m^2} \ln \left(\frac{0,68\gamma^2 c}{\omega b_{\min}} \right)$$

где $b_{\min} \sim h/mc$, γ - лоренц-фактор электрона.

При рассмотрении синхротронного излучения заряда в вакууме используем уравнение движения электрона в однородном магнитном поле

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{e[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]}{c}$$

причем электрон может быть релятивистским, то есть его энергия $\gamma = mc^2$.

В результате громоздких вычислений можно получить выражение для мощности излучения с поляризацией в направлении ОУ, приходящихся на одну гармонику

$$P_{n\Omega} = n^2 \frac{e^2 \omega_0^2}{6\pi^3 c \text{Sin}^{10} \theta} \frac{1}{\gamma^4} (1 + \gamma^2 \psi^2)^2 K_{2/3}^2(y)$$

где n – номер гармоники, $K_\nu(y)$ - модифицированная функция Бесселя.

В результате интегрирования по телесному углу и частоте можно получить полную мощность, излучаемую частицей

$$P = \frac{2e^4 B^2 \text{Sin}^2 \theta}{3m^2 c^3} \gamma^2$$

Глава 2. Источники синхротронного излучения.

Одним из источников синхротронного излучения является циклический ускоритель заряженных частиц (синхротрон), в котором электроны, подталкиваемые продольными импульсами электрического поля, ускоряются до скорости, близкой к скорости света, а постоянные магниты направляют их движение по замкнутой кольцевой траектории.

Каждый раз, пролетая через поле поворачивающего магнита, ультрарелятивистские электроны получают центростремительное ускорение и генерируют синхротронное излучение.

Для производства мощных пучков синхротронного излучения используются накопительные кольца, которые служат для накопления и длительного удержания пучка ускоренных частиц для производства фотонного излучения. Эти устройства имеют специально оборудованные каналы для вывода пучков синхротронного излучения из поворотных магнитов для использования в прикладных целях. Накопительное кольцо, по сравнению с синхротроном, имеет более плавную траекторию и в течение длительного времени поддерживает стабильное магнитное поле для того, чтобы обеспечить сохранность полученных электронов и нужную стабильность параметров пучка.

К источникам третьего поколения следует отнести специализированные накопительные кольца с большим числом прямолинейных участков достаточной длины для встраивания ондуляторов или вигглеров с каналами вывода СИ. Важной особенностью источников СИ третьего поколения является способность дополнительной инжекции для поддержания тока электронного пучка в накопительном кольце практически без прерывания работы источника СИ. Накопительные кольца третьего поколения улучшают такие качества рентгеновского излучения как поток и яркость.

К источникам четвертого поколения относятся рентгеновский лазер на свободных электронах и источники СИ на базе линейных ускорителей с возвратом мощности.

Глава 3. Рентгеноструктурный анализ на СИ.

Главными объектами рентгеноструктурных исследований, которые лучше проводить с помощью СИ, являются: кристаллография объектов микронного и субмикронного размера, а также кристаллография макромолекулярных кристаллов, в частности, биологических веществ. Кроме того, с помощью СИ исследуются структуры конденсированных состояний под внешними воздействиями. В этих случаях применение СИ является наиболее эффективным методом.

Наиболее ярким примером структурных исследований является исследование строения промежуточных и возбужденных структур в различных химических реакциях. Эти исследования относятся к разряду экспериментов с разрешением по времени и отличаются от обычного рентгеноструктурного анализа.

В исследованиях с разрешением времени могут решаться разные задачи. В одних определяют структуру вещества в переходном состоянии, в других – следят за динамикой процесса во времени.