



Синхротронное излучение в диагностике наносистем

4-й курс 8-й семестр 2007/2008

Синхротронное излучение – магнитотормозное электромагнитное излучение, испускаемое *релятивистскими* заряженными частицами, которые движутся по круговым орбитам под действием *постоянного* магнитного поля.

Излучение *нерелятивистских* частиц – **циклотронное**.

Под действием *переменного* магнитного поля – **ондуляторное** излучение.

Немного истории.

Синхротронное излучение

Теоретически предсказано и описано задолго до появления ускорителей.

1864 год, Максвелл – существование электромагнитного излучения от движущейся с ускорением заряженной частицы

1898 год, Лиенар – формула мощности радиационных потерь в зависимости от энергии частицы.

1912 год, Дж. Шотт – теоретическое описание свойств и углового распределения эл-м. излучения электрона на круговой орбите.

1947 год, Ф. Хабер – экспериментально обнаружил.

60-е годы – использование в экспериментах.

Создание ускорителей заряженных частиц

Источники 1-го поколения – исследования атомного ядра, создание потоков заряженных частиц высоких энергий.

1919-1932 – получение и использование высоких напряжений для непосредственного ускорения частиц

1931 – электростатический генератор Ван-де-Граафа

1932 – каскадный генератор (МэВ), первая ядерная реакция

1931-1944 разработка и создание циклических резонансных ускорителей.

1931, Э.О.Лоуренс – создание циклотрона (10-20 МэВ)

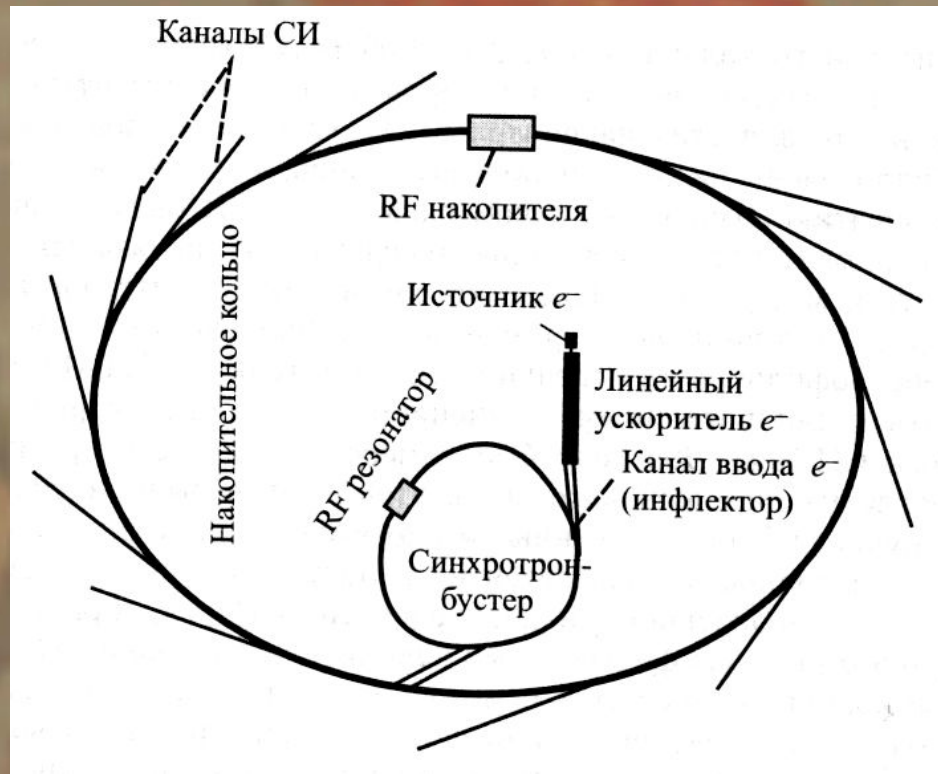
1940, Д.У.Керст – создание бетатрона

1944, В.И.Векслер – открытие эффекта автофазировки,

разработка и создание современных резонансных ускорителей: синхротрона, фазотрона, синхрофазотрона, микротрона

Начало 50-х гг. – предложен принцип знакопеременной фокусировки частиц (амер. учёные Н. Кристофилос, 1950; Э. Курант, М. Ливингстон, Х. Снайдер, 1952), существенно повысивший технический предел достижимых энергий в циклических и линейных У. з. ч.

Принципиальная схема источника синхротронного излучения 2-го поколения.



Собственно источник СИ - накопительное кольцо, являющееся 3-й ступенью. Сначала частицы генерируются и разгоняются в линейном ускорителе, далее инжектируются в бустер, где еще разгоняются и поступают в накопитель. (RF – наличие ВЧ ускорительных станций в кольце бустера и в накопительном кольце)

Классификация ускорителей заряженных частиц

- **По типу ускоряемых частиц** различают электронные ускорители, позитронные, протонные ускорители и ускорители ионов.
- **По характеру траекторий частиц** различают линейные ускорители (точнее, прямолинейные ускорители), в которых траектории частиц близки к прямой линии, и циклические ускорители, в которых траектории частиц близки к окружности (или спирали).
- **По характеру ускоряющего поля** У. з. ч. делят на **резонансные** ускорители, в которых ускорение производится переменным высокочастотным (ВЧ) электромагнитным полем и для успешного ускорения частицы должны двигаться в резонанс с изменением поля, и **нерезонансные** ускорители, в которых направление поля за время ускорения не изменяется. Последние в свою очередь делятся на **индукционные** ускорители, в которых электрическое ускоряющее поле создаётся за счёт изменения магнитного поля (эдс индукции), и **высоковольтные** ускорители, в которых ускоряющее поле обусловлено непосредственно приложенной разностью потенциалов.
- **По механизму, обеспечивающему устойчивость движения частиц в перпендикулярных к орбите направлениях (фокусировку)**, различают ускорители с **однородной** фокусировкой, в которых фокусирующая сила постоянна вдоль траектории (по крайней мере, по знаку), и ускорители со **знакопеременной** фокусировкой, в которых фокусирующая сила меняет знак вдоль траектории, т. е. чередуются участки фокусировки и дефокусировки. В применении к некоторым типам циклических ускорителей (синхротрон и синхрофазотрон) вместо терминов "однородная" и "знакопеременная" фокусировка пользуются терминами "слабая" и "сильная" ("жёсткая") фокусировка.
- **Резонансные** циклические ускорители могут быть классифицированы далее **по характеру управляющего - "ведущего" - магнитного поля и ускоряющего электрического поля**: ускорители с постоянным и с переменным во времени магнитным полем и соответственно ускорители с постоянной и с переменной частотой ускоряющего поля. Приведённая классификация (табл. 1) не охватывает ускорителей со встречными пучками и ускорителей, использующих коллективные методы ускорения. Первый тип является своеобразной разновидностью перечисленных в табл. 1 ускорителей: пучки частиц от ускорителей того или иного типа направляют навстречу друг другу. Второй тип отличается от всей совокупности описанных ускорителей по источнику ускоряющего поля.

| Тип траектории | Характер ускоряющего поля | Магнитное поле | Частота ускоряющего поля | Фокусировка | Название | Ускоряемые частицы |
|------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------|---|-----------------------------------|
| Окружность или спираль | Циклические ускорители | | | | | |
| | Нерезонансный, индукционный | Переменное | — | Однородная | Бетатрон | Электроны |
| | Резонансный | Постоянное | Постоянная | « | Циклотрон | Протоны (или ионы) |
| | | | | | Микротрон | Электроны |
| | « | « | « | Знакопеременная | Изохронный циклотрон | Протоны |
| | | | | | Секторный микротрон | Электроны |
| | « | « | Переменная | Однородная | Фазотрон | Протоны |
| | | | | | Знакопеременная | Секторный фазотрон |
| « | « | Переменное | Постоянная | Однородная | Синхротрон слабофокусирующий | Электроны |
| | | | | | Знакопеременная | Синхротрон сильнофокусирующий |
| « | « | « | Переменная | Однородная | Синхрофазотрон слабофокусирующий | Протоны |
| | | | | | Знакопеременная | Синхрофазотрон сильнофокусирующий |
| Прямая | Линейные ускорители | | | | | |
| | Нерезонансный, электростатический | — | — | — | Электростатический ускоритель, каскадный ускоритель | Протоны, электроны |
| | Нерезонансный, индукционный | — | — | — | Линейный индукционный ускоритель | Электроны |
| | Резонансный | — | Постоянная | — | Линейный резонансный ускоритель | Протоны, электроны |

Уникальные свойства и возможности СИ:

- Огромная яркость источника – большая чувствительность и скорость измерений.
- Спектр СИ – возможность получения монохроматических пучков рентгеновских лучей с настраиваемой длиной волны.
- Поляризованность излучения и возможность ей управлять – можно исследовать упорядоченные спиновые системы, например магнитные.
- Импульсный характер и малая длительность импульсов – возможность изучать быстро протекающие процессы (взрывы, фазовые переходы, химические реакции).
- Естественная высокая коллимированность – увеличивается контраст и разрешающая способность.

Наиболее известные и широко применяемые методы исследования с использованием СИ:

- Дифракционный рентгеноструктурный анализ – атомная и молекулярная структура кристаллических веществ.
- Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия – атомный состав.
- Рентгеновская спектроскопия поглощения – атомный состав.
- Методы абсорбционной спектроскопии вблизи скачков поглощения выбранных опорных атомов (XANES, EXAFS, NEXAFS, поверхностная EXAFS) – локальная атомная структура и химическое состояние элементов.
- Получение изображений в рентгеновских лучах (просвечивание, томография, рентгеновская микроскопия).
- Исследование магнитных структур и упорядочения спиновых структур с помощью дихроизма рассеяния и поглощения поляризованных рентгеновских лучей.

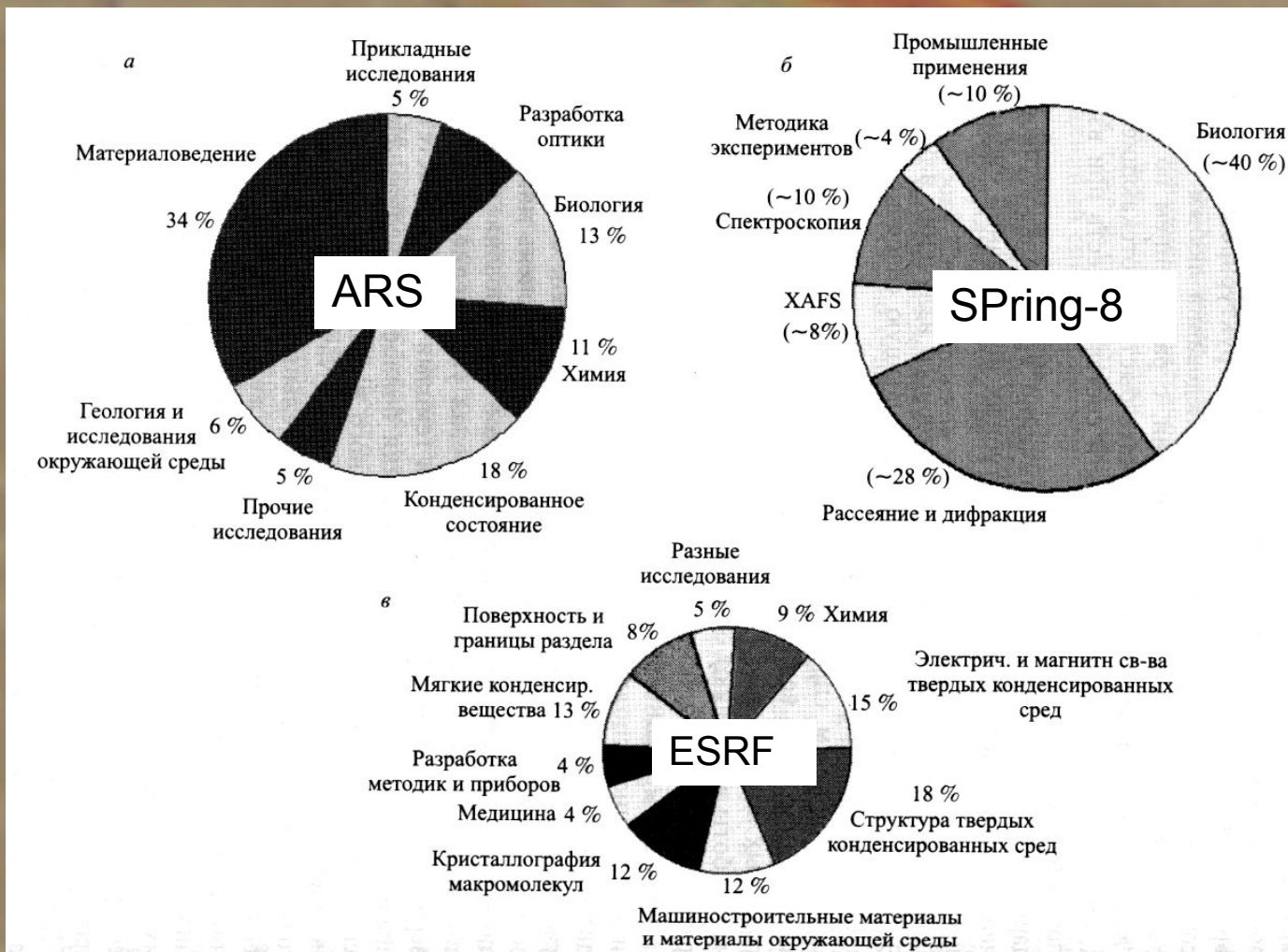
Области применения синхротронного излучения и решаемые задачи

| Отрасль | Решаемые задачи | Причина использования |
|------------------|--|--|
| Химия | <ul style="list-style-type: none"> - Анализ следов элементов и их химического состояния. - Анализ структуры и химического состава фармацевтических препаратов. - Атомная и молекулярная спектроскопия. - Исследование археологических объектов. - Исследование химических реакций (структура, состояние, состав, кинетики). - Исследование динамики поведения катализаторов в процессе реакций. - Исследование эмульсий и коллоидных веществ, процессов гелеобразования, контроль стабильности растворов. - Исследование фотохимических процессов на поверхностях. | Высокая яркость, коллимированность, настраиваемость на любую длину волны в широком диапазоне, временная структурированность с малой длительностью импульсов. |
| Материаловедение | <ul style="list-style-type: none"> - Исследование процессов роста, анализ качества кристаллов. - Исследование структуры и морфологии волокон, порошков, пленок, в т.ч. полимерных. - Прецизионное исследование распределения электронной плотности в кристаллах. - Фазовые структурные переходы, в т.ч. при высоких давлениях и различных температурах. - Атомная и электронная структура ВТСП. - Локальная атомная структура аморфных твердых тел, жидкостей. - Исследование высоко-коррелированных электронных систем и магнитных структур. - Исследование оптических и магнитных свойств материалов. - Исследование старения материалов. - Задачи сертификации по фазовому составу и дефектности. | Высокая яркость, коллимированность, поляризация и настраиваемость длины волны излучения. |
| Экология | <ul style="list-style-type: none"> - Анализ токсичных тяжелых атомов в биологических материалах. - Разработка катализаторов для очистки выхлопных газов. - Химический, элементный анализ, обнаружение загрязнителей окружающей среды. | Высокая яркость, коллимированность, и настраиваемость длины волны излучения. |
| Машиностроение | <ul style="list-style-type: none"> - Анализ распределения механических деформаций. - Анализ примесей. - Глубокая рентгеновская литография для микроэлектроники. - Исследование поверхностей и границ раздела (износ, коррозия, адгезия, шероховатость, смачивание). - Исследование материалов и приборов для микроэлектроники. - Разработка сплавов и электрических батарей для водородных аккумуляторов. | Высокая яркость, коллимированность, настраиваемость длины волны излучения, когерентность (для контраста). |
| Геология | <ul style="list-style-type: none"> - Исследование процессов в земной коре (высокие Т и Р). - Исследование механизмов землетрясений. - Структура метеоритов и межпланетной пыли. | Высокая яркость, коллимированность, регулируемый спектр |
| Биология | <ul style="list-style-type: none"> - Анализ атомной структуры белков и выяснение ее связи с биологическими функциями. - Структура клеток, вирусов, живых систем. - Биологические реакции в реальном времени. - Динамика мышечных волокон. | Высокая яркость, коллимированность, временная структурированность. |
| Медицина | <ul style="list-style-type: none"> - Получение изображений в рентгеновских лучах с высоким пространственным разрешением и регулируемой контрастностью. - Диагностика рака, исследование капилляров. | Высокая яркость, коллимированность. |

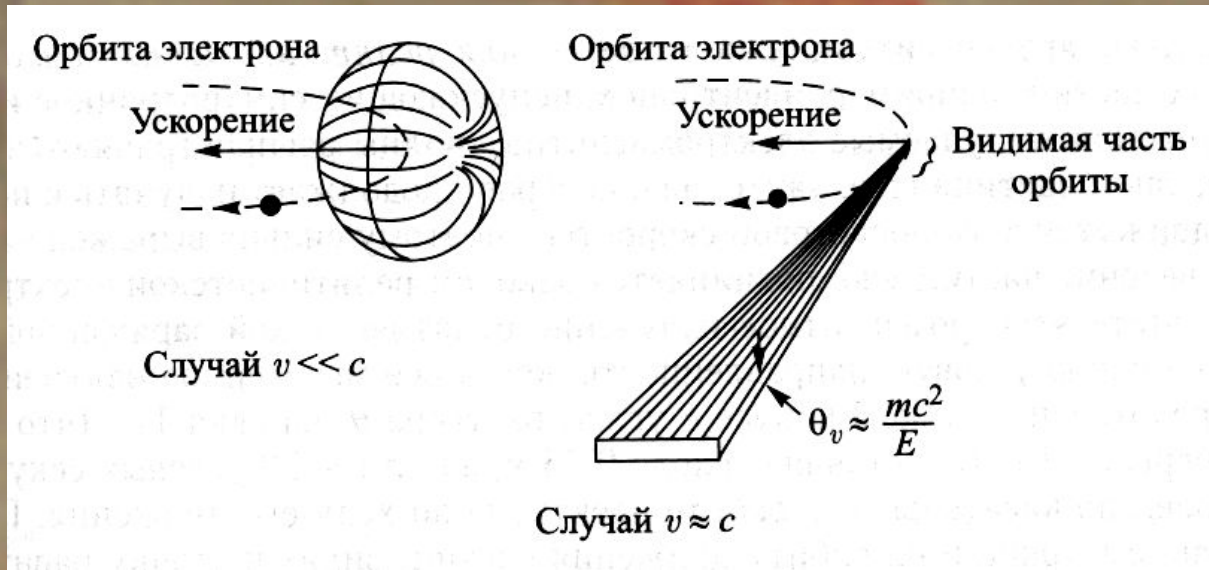
Наиболее крупные действующие источники СИ

| Страна | Название источника | Энергия, ГэВ | Периметр орбиты кольца, м |
|-------------------|--|---|---------------------------|
| Англия | <i>SRS Synchrotron Radiation Source</i> | 2,0 | 96 |
| Бразилия | <i>LNLS Laboratorio Nacional de Luz Sincrotron</i> | 1,37 | 93 |
| Германия | <i>ANKA Angstromquelle Karlsruhe</i> | 2,5 | 110 |
| | BESSY II | 1,7 и 1,9 | 240 |
| | <i>DELTA Dortmund Electron Accelerator</i> | 1,5 | 115 |
| | <i>PETRA II Positron-Electron Tandem Ring Accelerator Facility</i> | 12,0 | 2300 |
| | <i>DORIS III Double Ring Store</i> | 4,45 | 290 |
| Италия | ELLETRA | 2,0 и 2,4 | 260 |
| Канада | <i>CLS Canadian Light Source</i> | 2,9 | 170 |
| Россия | ВЭПП-3 | 2,2 | 75 |
| | КИСИ | 2,5 | 124 |
| США | <i>ALS Advanced Light Source</i> | 1,5 и 1,9 | 197 |
| | APS Advanced Photon Source | 7 | 1000 |
| | <i>CAM-D Center for Advanced Microstructures and Devices</i> | 1,3 и 1,5 | |
| | <i>CHESS Cornell High Energy Synchrotron Source</i> | 5,5 | 770 |
| | <i>NSLS II National Synchrotron Light Source</i> | 2,8 | 170 |
| | <i>SPEAR III Stanford Positron Electron Asymmetric Ring</i> | 3,0 | 234 |
| | Франция | ESRF European Synchrotron Radiation Facility | 6,03 |
| Швейцария | <i>SLS Swiss Light Source</i> | 2,4-2,7 | 288 |
| Япония (всего 13) | PF Photon Factory | 2,5 | 187 |
| | | | |

Распределение времени работы крупнейших источников синхротронного излучения



Пространственное распределение фотонного излучения нерелятивистских и релятивистских электронов.



Для нерелятивистской частицы

$$R = mv / (qB)$$

$$\omega_c = qB / m$$

$$I \sim \sin^2 \alpha$$

Для релятивистских и ультрарелятивистских частиц

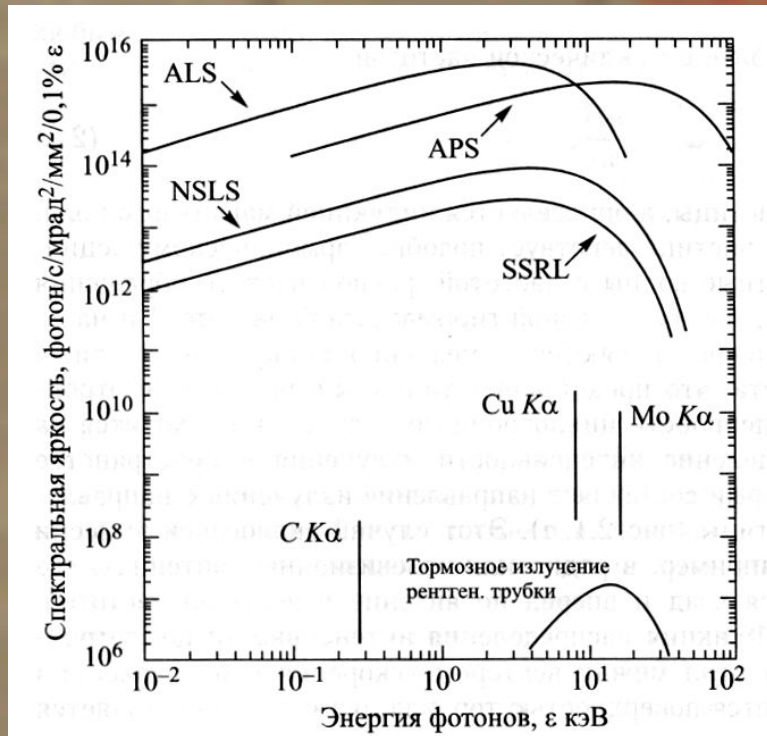
$$E = m_0 c^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

$\gamma = 1 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = E / m_0 c^2$
 релятивистский лоренц-фактор

$$\theta_v \sim \gamma^{-1} = mc^2 / E$$

СИ сильно
 коллимировано

Спектральное распределение синхротронного излучения



$$M = M_0 \gamma,$$

$$\lambda = \lambda_0 \gamma$$

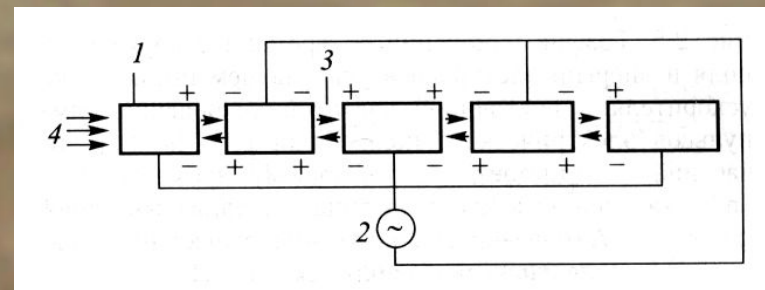
Частотный
сдвиг

$$\omega_{\max} \sim \omega_c \gamma^3,$$

ω_c – циклотронная частота

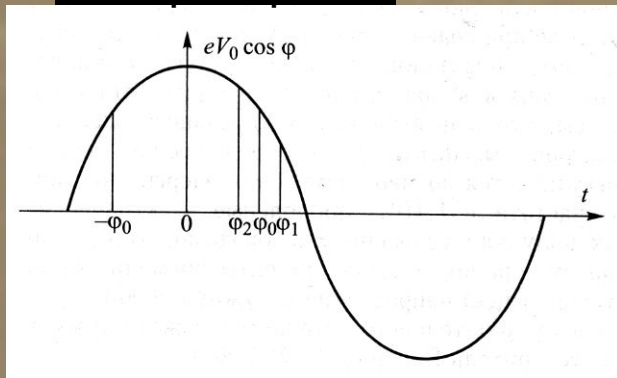
Для электрона(позитрона) на орбите длины 300 м с частотой 10⁶ Гц с энергией 5 ГэВ, $\gamma = 1957E$ максимум интенсивности СИ приходится на частоту 10¹⁸ Гц, которая соответствует рентгеновскому диапазону.

Принцип резонансного ускорения



Свойства синхротронного излучения из поворотных магнитов

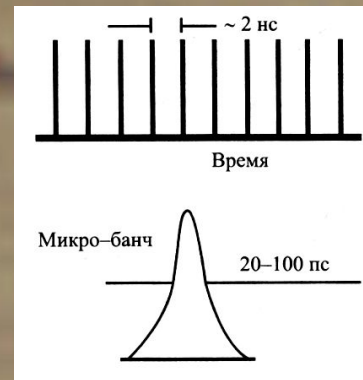
Эффект автофазировки



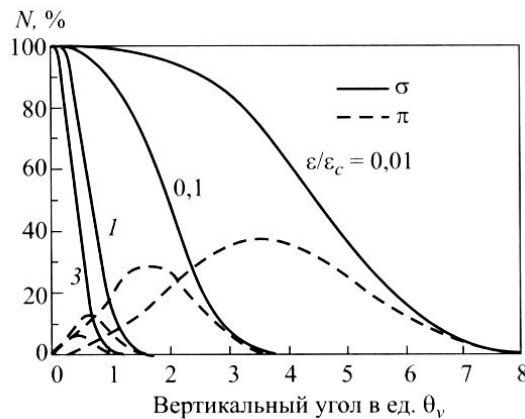
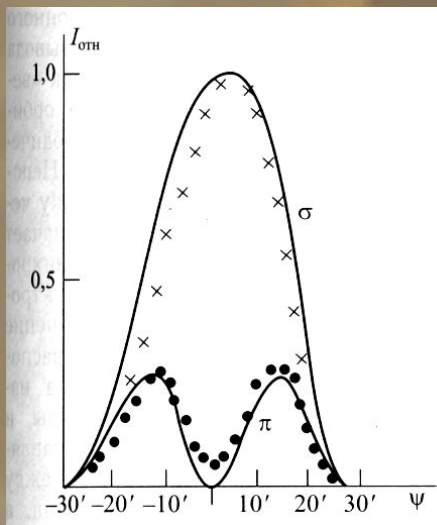
ϕ_0 – равновесная фаза, при котором частица получает необходимое количество энергии, компенсирующее потери на СИ, и остается на одной орбите

Период обращения по равновесной орбите $T = 2\pi R / (c\beta)$, т.е. чем больше энергия, тем больше период обращения

Временная структура СИ



Поляризация СИ



Пучок СИ из поворотного магнита в небольшом слое параллельном плоскости орбиты имеет почти 100% линейную поляризацию с вектором электрического поля в горизонтальной плоскости, а выше и ниже этого слоя СИ эллиптически поляризовано, при этом направление вращения вектора поляризации в верхней и нижней половинах пучка противоположно.

Полезные цифры и формулы

- Постоянная планка $h=6,628 \cdot 10^{-34}$ Дж*с
- $1 \text{ эВ}=1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
- $\lambda[\text{Å}]=12,4/E[\text{кэВ}]$
- $\lambda=cT=c/v=c/2\pi\omega$
- Фактор Лоренца $\gamma=1/\sqrt{1-(v/c)^2}=E/(mc^2)$, для релятивистских частиц $\gamma>2$, $E>1 \text{ МэВ}$
- $1 \text{ кэВ}=10^3 \text{ эВ}$
- $1 \text{ МэВ}=10^6 \text{ эВ}$
- $1 \text{ ГэВ}=10^9 \text{ эВ}$
- $1 \text{ млн}=10^6$