



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)

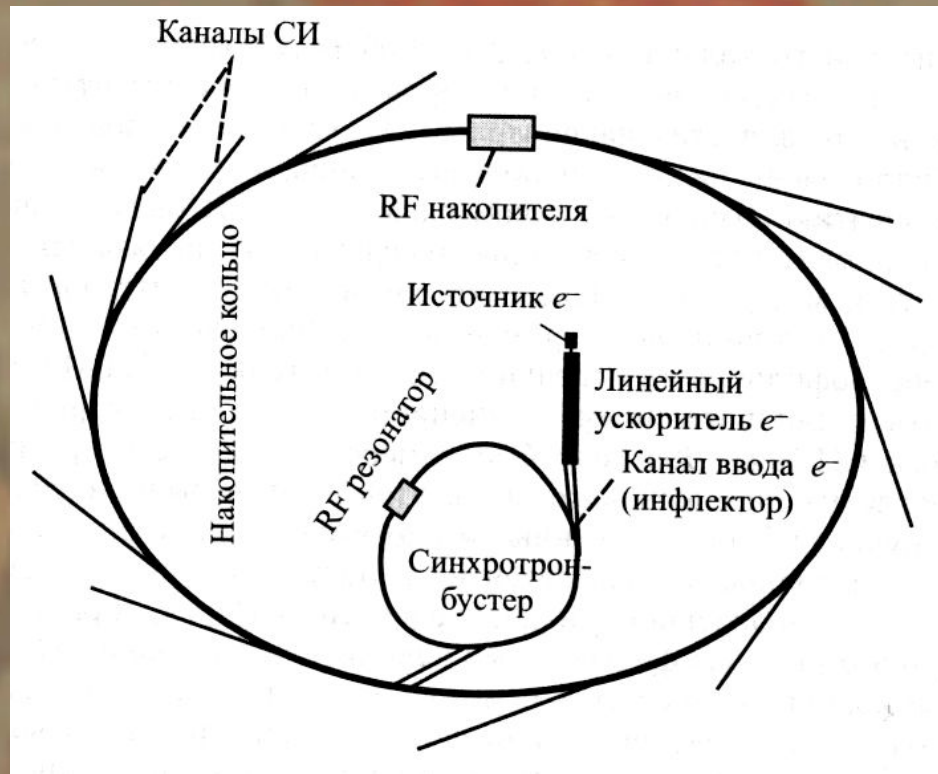
1940, Д.У.Керст – создание бетатрона

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 Знакопеременная	Фазотрон	Протоны
					Секторный фазотрон	
«	«	Переменное	Постоянная	Однородная Знакопеременная	Синхротрон слабофокусирующий	Электроны
					Синхротрон сильнофокусирующий	
«	«	«	«	Переменная Знакопеременная	Синхрофазотрон слабофокусирующий	Протоны
					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.

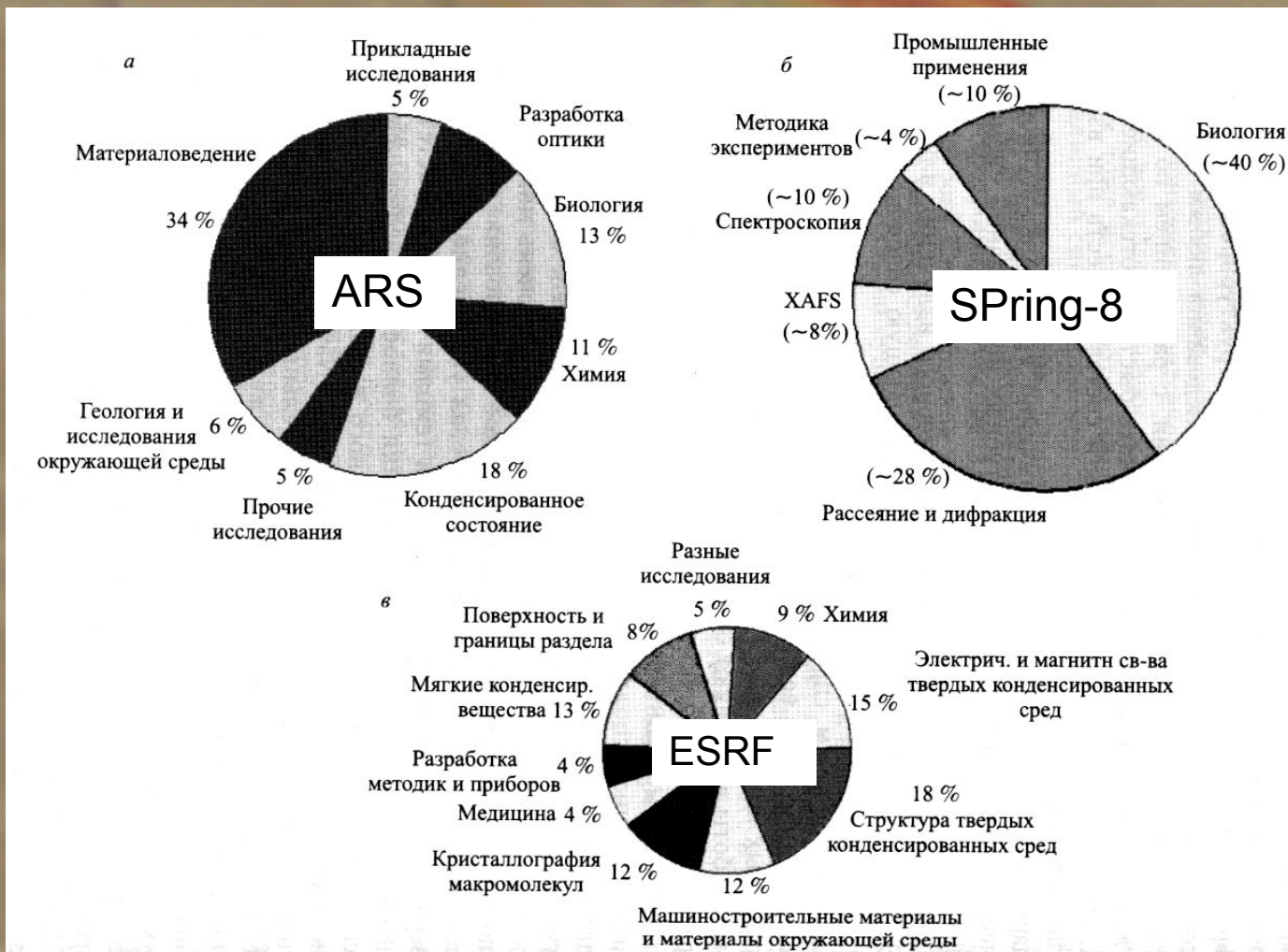
Области применения синхротронного излучения и решаемые задачи

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.

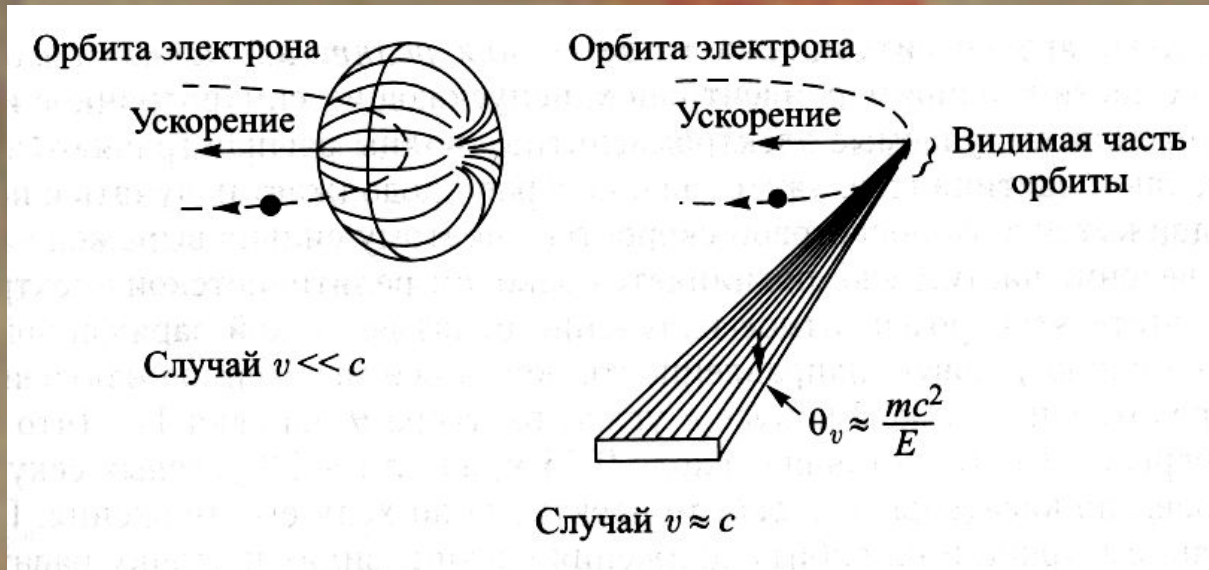
Наиболее крупные действующие источники СИ

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

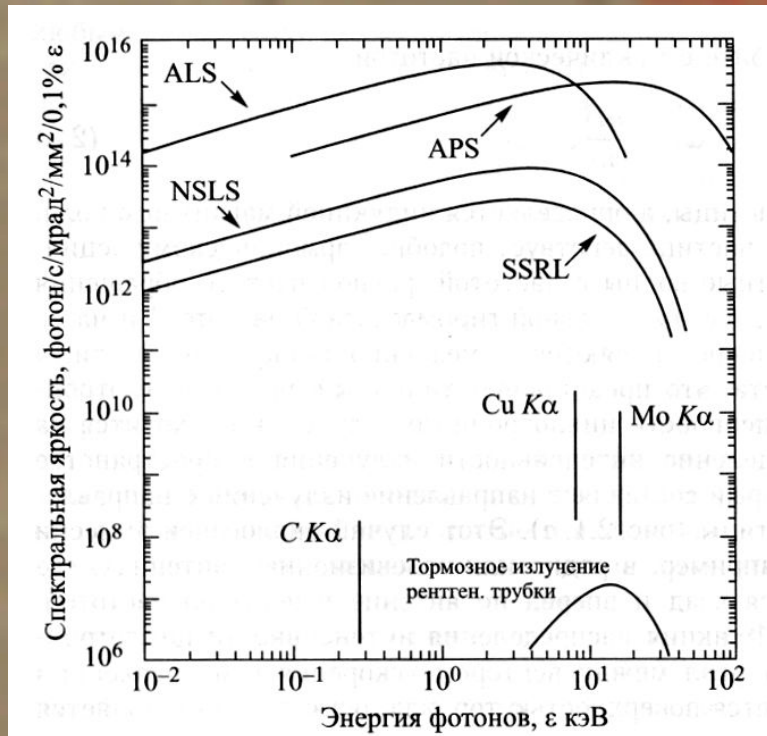
$$E = m_0 c^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

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

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

СИ сильно
коллимировано

Спектральное распределение синхротронного излучения



$$M = M_0 \gamma,$$

$$\lambda = \lambda_0 \gamma$$

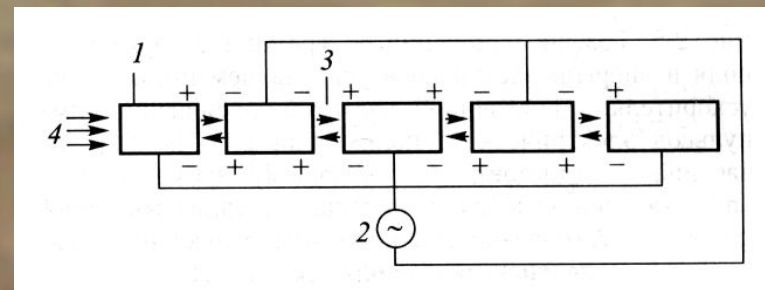
Частотный
сдвиг

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

ω_c – циклотронная частота

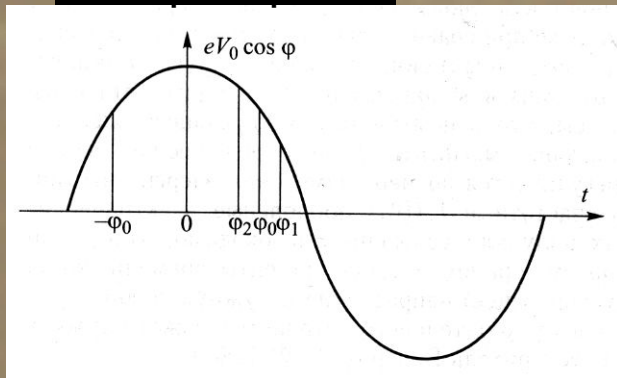
Для электрона(позитрона) на орбите длины 300 м с частотой 10⁶ Гц с энергией 5 ГэВ, $\gamma = 1957E$ максимум интенсивности СИ приходится на частоту 10¹⁸ Гц, которая соответствует рентгеновскому диапазону.

Принцип резонансного ускорения



Свойства синхротронного излучения из поворотных магнитов

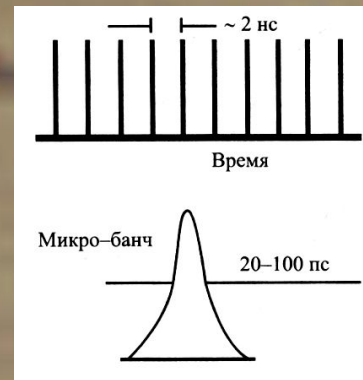
Эффект автофазировки



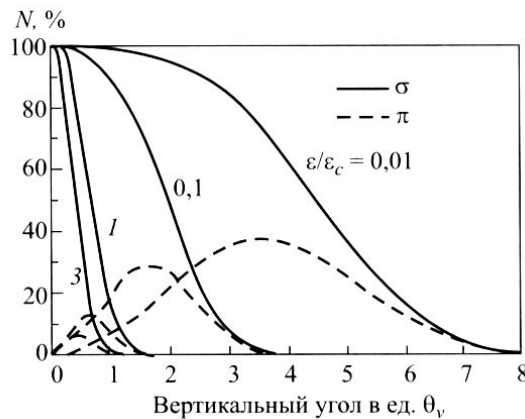
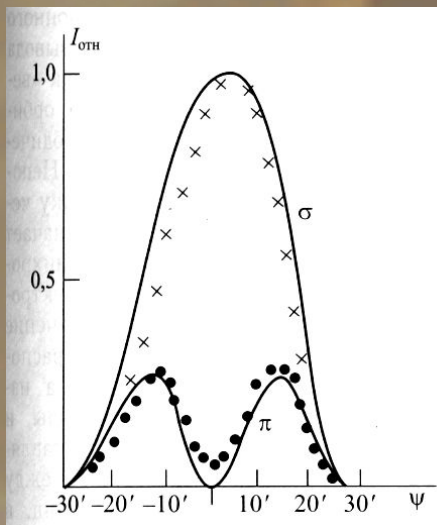
ϕ_0 – равновесная фаза, при котором частица получает необходимое количество энергии, компенсирующее потери на СИ, и остается на одной орбите

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 $\gamma>2$, $E>1 \text{ МэВ}$
- $1 \text{ кэВ}=10^3 \text{ эВ}$
- $1 \text{ МэВ}=10^6 \text{ эВ}$
- $1 \text{ ГэВ}=10^9 \text{ эВ}$
- $1 \text{ млн}=10^6$