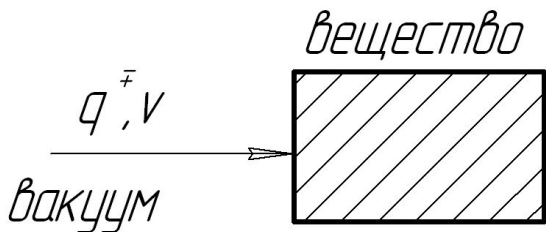


Лекция 7

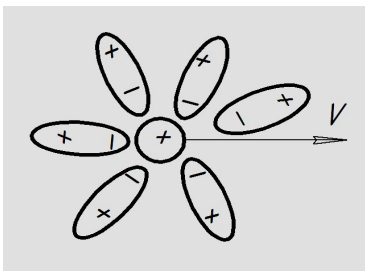
«Черенковское и синхротронное излучение»

1. Условие для возникновения черенковского света
2. Направленность излучения
3. Интенсивность излучения
4. Удельные потери на черенковское излучение
5. Черенковские счетчики частиц
6. Синхротронное излучение
7. Характеристики синхротронного излучения
8. Поляризация и частотный спектр

Условие для возникновения черенковского света



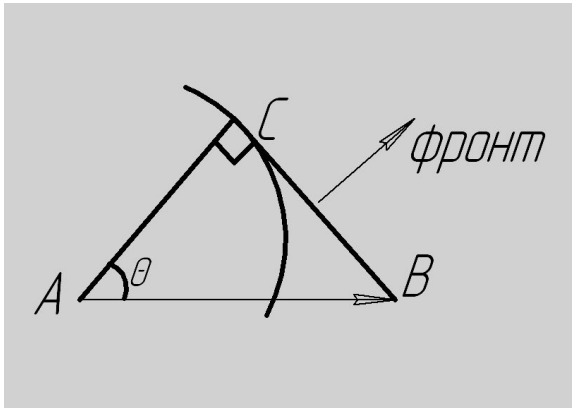
Черенковский свет образуется при движении частицы со скоростью, превышающей скорость распространения света в данной среде $V > (c/n)$, или что тоже самое $\beta > 1/n$, где n – оптический показатель преломления света.



При $V < (c/n)$ поляризация окружающих атомов квазисферически симметрична. Такая поляризация должна вызывать сферическую электромагнитную волну – но таких волн нет в природе. Излучение не возникает.

При $V > (c/n)$ электрическое поле вытянуто поперек движения и не обладает сферической симметрией. При деполяризации атомов может возникнуть э/м волна.

Направленность излучения



Фронт этой волны строится по принципу Гюйгенса. Угол θ получается из геометрического соотношения

$$\cos \theta = \frac{AC}{AB} = \frac{\left(\frac{c}{n}\right)\Delta t}{V\Delta t} = \frac{1}{n} \frac{1}{\left(\frac{V}{c}\right)} = \frac{1}{n\beta}$$

Анализ формулы $\cos \theta = 1/n\beta$ дает ряд предельных кинематических характеристик:

- минимальное значение β получается в виде $\beta^{\min} = 1/n$ (для $\cos \theta = 1$)
излучение направлено вдоль траектории частицы
- максимальный угол фронта излучения равен $\theta_{\max} = \arccos(1/n)$

Например, для полистирола ($n=1,59$) значение $\beta^{\min} = 0,63$.
Это соответствует минимальной энергии электрона

$$M_e^{\min} = m_e c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) = 0,5 \left(\frac{1}{\sqrt{1-0,63^2}} - 1 \right) = 0,65$$

Интенсивность излучения

Интенсивность черенковского излучения на единицу длины пути (1 см) в единичном интервале частот (Гц)

$$\frac{d^2 N}{dx dv} = \frac{4\pi^2 e^2 Z^2}{hc^2} \left(1 - \frac{1}{n(v)^2 \beta^2} \right) = \frac{4\pi^2 e^2 Z^2}{hc^2} \sin^2 \theta = \frac{2\pi Z^2}{137c} \sin^2 \theta$$

Из этой формулы следует:

-спектр одинаков для частиц разных типов (e^- , π^+ , p^+ ...) при одинаковом по величине заряде Z ;

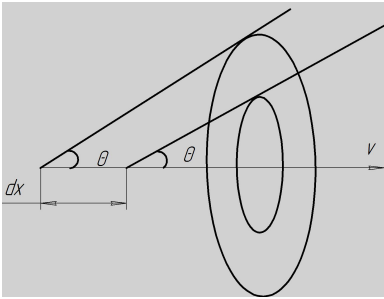
-число фотонов пропорционально квадрату заряда налетающей частицы – Z^2 ;

-с ростом скорости β число фотонов растет и достигает

значения $\frac{4\pi^2 e^2 Z^2}{hc^2} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$ при $\beta_{\max} \approx 1$

- распределение спектра - равномерное, не зависит от частоты фотонов. Энергия сосредоточена в коротко-волновой (синей) части спектра.

Удельные потери на черенковское излучение



Согласно формуле Тамма-Франка число фотонов в области видимого света N , излучаемых частицей с зарядом Z на 1 см пути, составляет около $N \approx 500 \cdot Z^2 \cdot \sin^2 \theta$ фотоны летят в конусе с раствором 2θ

Потери энергии составляют малую долю от энергии налетающей частицы.

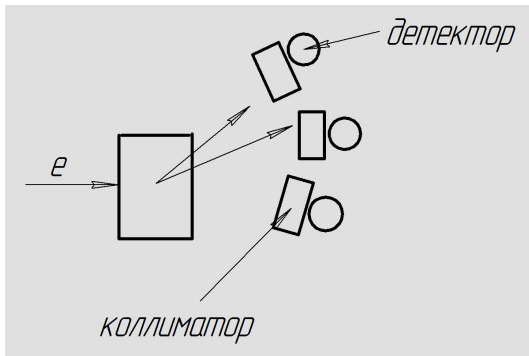
$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{чер}} \approx \frac{dN}{dx} \bar{E}_{\gamma} \approx 500 \cdot 1 = 500 \text{ —}$$

Удельные ионизационные потерями в воде (1/см)

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2 \text{ —}$$

Отношение потерь энергии $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{чер}} / \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{иониз}} = \frac{500 \text{ эВ / см}}{2 \cdot 10^6 \text{ эВ / см}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \approx 2 \cdot 10^{-2} \%$

Черенковские счетчики частиц

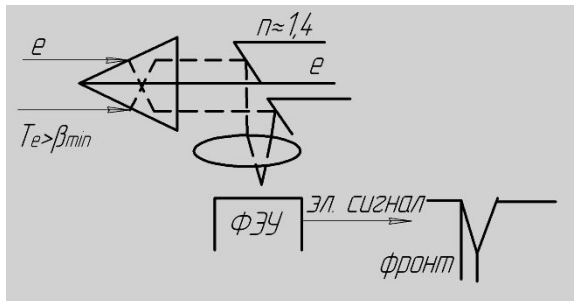


Дифференциальный способ позволяет по углу излучения θ узнать о скорости частицы:

в соответствии с формулой $\cos \theta = 1/n\beta$

Счетчик содержит разветвленную оптическую систему с коллиматорами лучей света по

разным направлениям, точность $d\beta/\beta = d\theta\sqrt{\beta^2 n^2 - 1}$



Интегральный способ. В счетчике регистрируются все заряженные частицы со скоростью $\beta > \beta_{\min}$.

Сигналы короткие $\sim 10^{-10} - 10^{-9}$ сек.

Например, в счетчике с водяным радиатором ($n=1,33$, $\beta_{\min} = 0,75$) электроны регистрируются начиная с кинетической энергии $M_{\epsilon}^{куВ} = 0,26$

а протоны - начиная с $M_p^{куВ} \approx 470$

Синхротронное излучение

Равномерное вращение электрона по окружности в поперечном магнитном поле вызывает синхротронное (или магнитотормозное) излучение, которое обусловлено большим центростремительным ускорением действующим на частицу (см. «Теория Поля» - Ландау)

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_e = \frac{2}{3} \frac{e^4}{c^3 m_e^2} \left[\frac{\left\{ \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V} \times \vec{H}] \right\}^2 - \frac{1}{c^2} (\vec{E} \cdot \vec{V})^2}{(1 - \beta^2)} \right]$$

Связь интенсивности излучения с \vec{E} и \vec{H} напряженностями

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_e \sim \frac{[\vec{V} \times \vec{H}]^2}{m_e^2 (1 - \beta^2)} \sim |\dot{x}|^2 \quad - \text{ в отсутствии электрического поля } \vec{E}$$

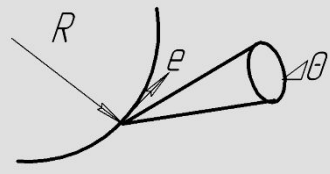
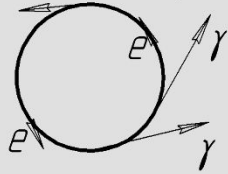
Используя зависимость $E_e = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ получаем $E_e^2 \sim \frac{1}{(1 - \beta^2)}$

Сильная зависимость интенсивности от энергии электронов

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_e \sim \frac{1}{1 - \beta_e^2} \sim E_e^2$$

Характеристики синхротронного излучения

излучение вдоль траектории



Равномерное вращение электрона по окружности создает равномерное излучение вдоль орбиты по касательной в небольшом угловом растворе углов:

Например, для энергии электрона

$E_e = 100 \text{ МэВ}$ значение $\Delta\theta = \frac{0,5 \text{ МэВ}}{100 \text{ МэВ}} \cdot 57^\circ = \left(\frac{1}{4}\right)^\circ$

$$\Delta\theta = \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{m_e c^2}{E_e}$$

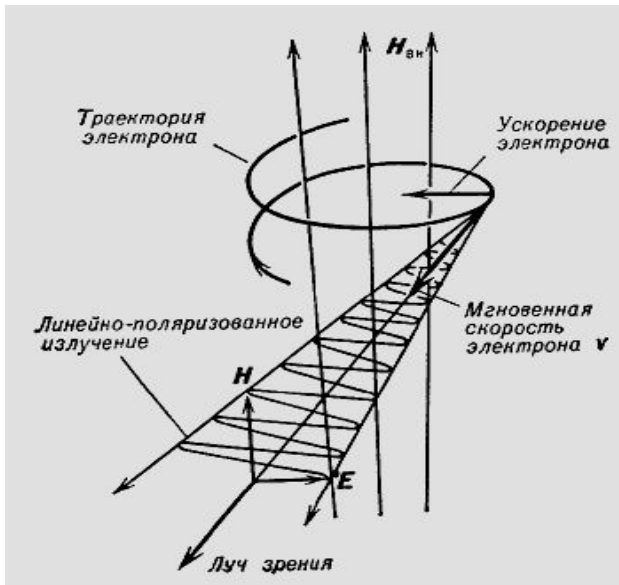
В накопителях получают узкий с высокой плотностью поток излучения на уровне 10^{15} фотон/сек/мм²/мрад

Характерная частота синхротронного излучения $\omega_c \approx \omega_0 \cdot \gamma^2$

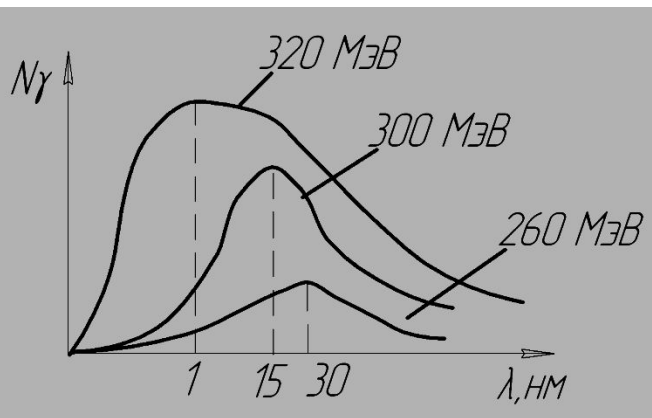
$\omega_0 = \frac{V}{R} = \frac{ecH}{E_e}$ - циклотронная частота; $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ - лоренц-фактор

Для релятивистских энергий электронов частота синхротронного излучения ω_c на несколько порядков выше циклотронной частоты ω_0

Поляризация и частотный спектр



При вращении электрона в синхротроне получается поляризованное излучение гамма-квантов. Сила Лоренца действует в плоскости орбиты, в этой же плоскости лежит вектор E электрического поля. В результате получается узконаправленный и поляризованный пучок излучения.



Частотный спектр излучения представляет собой колокол с максимумом излучения на длине волны

$$\lambda_{\text{тик}} \approx \frac{4\pi m_e c^2}{eHc} \cdot \left(\frac{m_e c^2}{E_e} \right)^2$$

С ростом энергии E_e максимум спектра сдвигается в область меньших длин

Длина когерентности

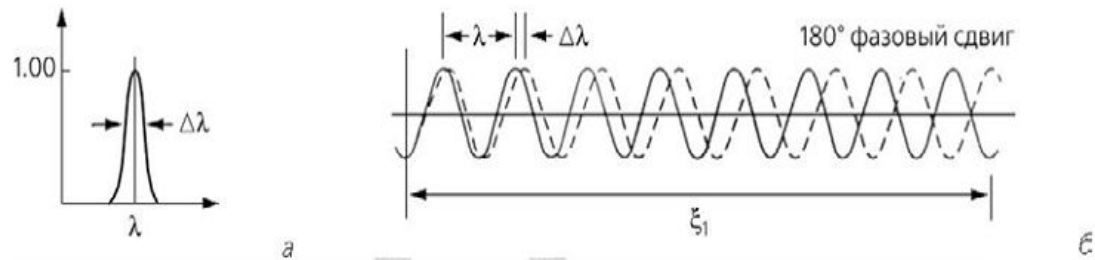


Рис.6. Связь между спектральной шириной линии (а) и продольной корреляционной длиной ξ_1 (б). Величина ξ_1 определяется расстоянием, на котором фазовый сдвиг между двумя волнами с разницей в длинах волн $\Delta\lambda$ становится равным 180° , т.е. волны приходят в противофазе и гасят друг друга.

$$\xi_1 = c \Delta t \approx c / \Delta \nu = \lambda^2 / \Delta \lambda,$$

Характеристики синхротронного источника

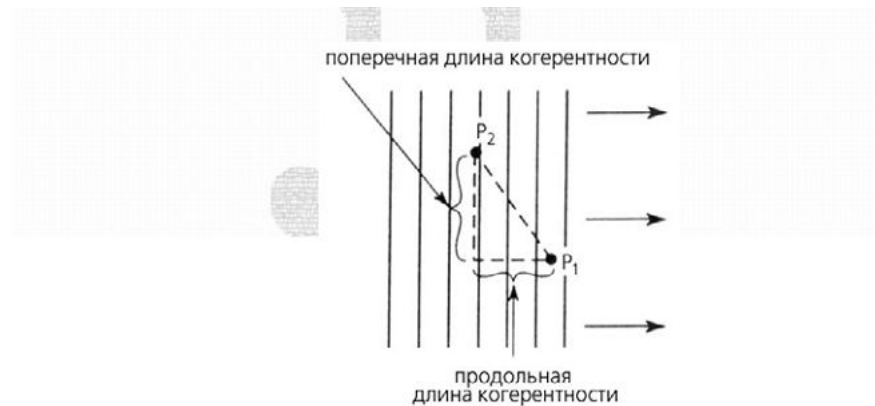


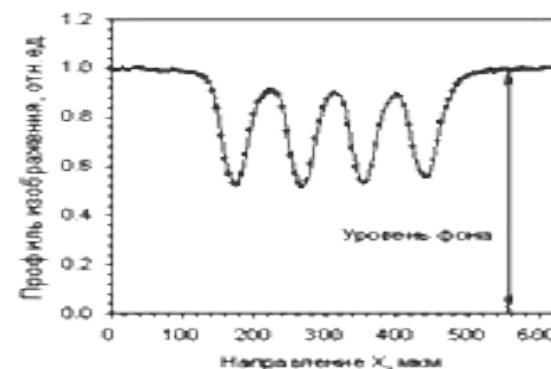
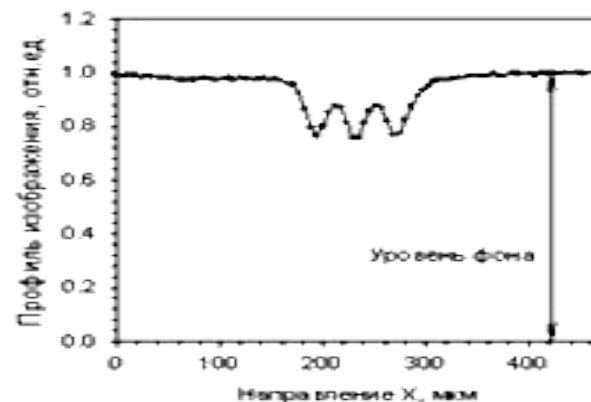
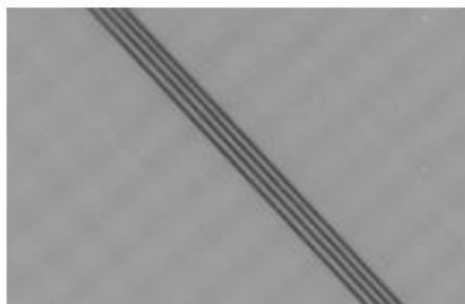
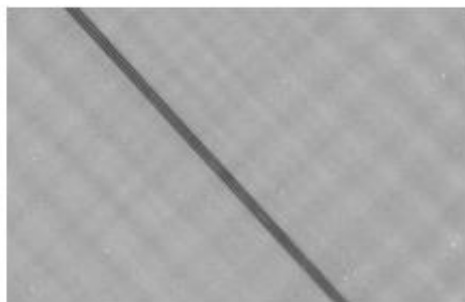
Рис.5. Продольная и поперечная длины когерентности. Фронт волны распространяется в направлении стрелок. Точки P_1 и P_2 ограничивают ту область, в пределах которой волновое поле еще можно считать когерентным (выбрав точки в пределах этой области в качестве источников, можно наблюдать интерференционную картину).

Таблица

Сравнение когерентных свойств лазера и ондуляторного синхротронного источника

Свойства	30 мВт He-Ne лазер	Ондулятор
Интенсивность (фотоны/с)	10^{17}	10^9
Длина волны λ (нм)	632.8	0.15
Продольная длина когерентности	30 см (500000λ)	1.5 мкм (10000λ)
Поперечная длина когерентности	1 см (15000λ)	10 мкм (60000λ)

Пространственное разрешение методики СИ



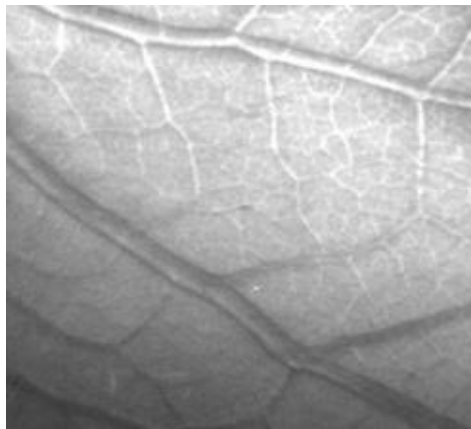
Слева: изображения эталонов W-20 (вверху) и W-50 (внизу) из вольфрамовой проволоки диаметром 20 и 50 мкм, соответственно, Справа: профили изображений проволок вдоль направления X, перпендикулярного проволочному эталону.

Угловое отклонение пучка

Угловое отклонение пучка на границе воздух-объект в приближении геометрической оптики равно

$$\delta\alpha = (1.5 \cdot 10^{-6} \lambda^2) \operatorname{ctg} \alpha$$

$[\lambda] = \text{ангстрем}$



Изображение древесного листа, полученное методом рефракционной интроскопии.

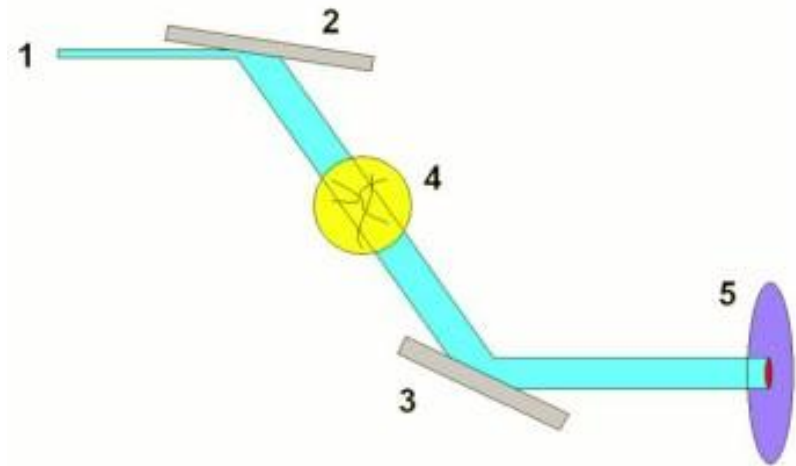


Схема установки по измерению рефракционного контраста. 1-падающий пучок СИ, 2-кристалл-монохроматор, 3-кристалл-анализатор 4-исследуемый объект, 5-регистрирующее устройство (детектор на основе ПЗС-матрицы).