

Ба 155595

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Б С С Р

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.И.ЛЕНИНА

На правах рукописи

ДУБОВСКАЯ Ирина Яковлевна

КОГЕРЕНТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОНОВ И
 γ -КВАНТОВ КАНАЛИРУЮЩИМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ
В КРИСТАЛЛЕ

/Специальность 01.04.02 -
Теоретическая и математическая физика/

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Минск - 1978 г.

Бз 155595

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Б С С Р

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.И.ЛЕНИНА

На правах рукописи

ДУБОВСКАЯ Ирина Яковлевна

КОГЕРЕНТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОНОВ И
 γ -КВАНТОВ КАНАЛИРУЮЩИМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ
В КРИСТАЛЛЕ

/Специальность 01.04.02 -
Теоретическая и математическая физика/

АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ на соискание ученой степени кандидата
Физико-математических наук

Минск - 1978 г.

Работа выполнена на кафедре ядерной физики и мирного использования атомной энергии Белорусского ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. В.И. Ленина.

Научный руководитель:

профессор, доктор физико-математических наук
БАРЫШЕВСКИЙ В.Г.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор физико-математических наук
КАДАШНИКОВ Н.П. (Московский инженерно-физический институт)

старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

РОМАНОВА Т.С. (НИИ Прикладных физических проблем при Белгосуниверситете имени В.И. Ленина)

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический институт АН СССР имени П.Н. Лебедева.

Защита диссертации состоялась 5 мая 1978 года в 10 часов на заседании специализированного Совета К 056.03.09 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете им. В.И. Ленина (220080, г. Минск-80, Университетский городок, главный корпус, ауд. 206).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгос-университета им. В.И. Ленина.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1978 г.

Ученый секретарь Совета
доцент

Л. И. КОМАРОВ

АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Явления, возникающие при когерентном взаимодействии заряженных частиц с монокристаллами, широко применяются для изучения строения вещества, измерения времени протекания ядерных реакций, исследования поверхностных свойств кристаллов и других важных для ядерной физики и физики высоких энергий характеристик. Особый интерес в этой связи вызывает проблема когерентного излучения, образованного ультрарелятивистскими заряженными частицами, пролетающими через кристалл. В многочисленных работах, посвященных процессам излучения в кристаллах, была построена теория когерентного тормозного излучения в кристалле в борновском и эйкональном приближениях. Учет влияния периодичности кристалла на излучаемые фотоны привел к открытию нового вида излучения в кристаллах - параметрического излучения. Следует, однако, обратить внимание на то, что во всех ранее вышедших работах фактически совершенно не учитывалась возможность радикального изменения характера поперечного движения заряженной частицы в кристалле, а именно, возможность возникновения финитности движения. Между тем, экспериментально и теоретически было показано, что частица, влетающая в кристалл под малым углом к кристаллографической оси /плоскости/ существенно изменяет характер поперечного движения вследствие явления каналирования.

Целью настоящей работы является анализ влияния эффекта каналирования заряженной частицы на радиационные процессы в кристалле. В работе показано, что явление каналирования приводит к появлению нового типа рентгеновского и относительно

мягкого γ -излучения. В работе дан качественный анализ свойств указанного излучения и построена количественная теория рентгеновского и γ -излучения каналирующей частицы вдали от дифракции и в условиях дифракции.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Показано, что в условиях каналирования возникает новый тип рентгеновского и мягкого γ -излучения, обусловленный переходами частицы между дискретными уровнями ее поперечного движения.

Показано, что в процессах излучения фотонов каналирующей частицей в кристалле возможно наблюдение сложного и аномального эффектов Допплера.

Показано, что и при досветовом движении в среде с показателем преломления $n < 1$ возможно излучение, сопровождающееся возбуждением самой излучающей системы, вследствие ограничения когерентной длины излучения, например, из-за наличия границ или поглощения γ -квантов в среде.

Найдено точное решение квадрированного уравнения Дирака с одномерным периодическим потенциалом, описывающее процесс рассеяния ультрарелятивистской частицы на кристалле.

Построена квантовая теория указанного излучения вдали от дифракции и в условиях дифракции излучаемых фотонов.

Предсказано явление радиационного охлаждения пучков заряженных каналирующих ультрарелятивистских частиц.

Предложено квантовомеханическое объяснение наблюдаемых аномалий в зеркальном отражении ионов от поверхности монокристаллов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Спектр рассматриваемого в работе когерентного излучения состоит из пиков и лежит в области характерной для энергий возбуждения ядер и внутренних атомных оболочек вещества $\omega \sim 1 - 10^4$ КэВ для энергии позитрона Е-ПэВ. Это обстоятельство позволяет осуществить в указанной области энергий возбуждение ядер, входящих в состав мишени. Зависимость угловых, спектральных и поляризационных свойств излучения от оптической анизотронии вещества позволяет, например, исследовать амплитуду рассеяния γ -кванта на поляризованных ядрах.

Указанное излучение может быть использовано также как источник квазимонохроматического рентгеновского и γ -излучения с плавноменяющейся частотой, удобный для исследования структуры вещества, а также для других ядерно-физических исследований. Предсказанная в работе возможность радиационного охлаждения пучков ультрарелятивистских заряженных частиц представляет интерес для сужения пучков в физике высоких энергий.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Материалы диссертации докладывались на УП и УШ Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами /Москва, 1975, 1976/, на семинаре Всесоюзной Школы теоретической ядерной физики МИФИ /Москва, 1976/.

ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертация состоит из четырех глав, заключения и У приложений, содержит 137 страниц машинописного текста. Список Литературы /6 страниц/ содержит 113 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена качественному анализу процесса когерентного излучения рентгеновских фотонов и γ -квантов каналирующей в кристалле частицей.

В первом параграфе дан краткий обзор развития проблемы излучения заряженных частиц в кристалле, а также обзор работ, непосредственно касающихся рассмотренного в диссертации когерентного излучения.

Во втором параграфе на основе анализа когерентной длины излучения рассматриваются угловые и спектральные свойства излучения, образованного каналирующей частицей. Показывается, что заряженная каналирующая частица может быть сопоставлена с движущимся в среде осцилятором, собственная частота которого в системе покоя зависит от энергии частицы. Например, в случае плоскостного каналирования.

$$\begin{aligned}\Omega'_{\gamma\gamma} &= E_{\gamma} - E_{\gamma} = 1/2m (p_{x\gamma}^2 - p_{ix\gamma}^2) \\ \Omega_{\gamma\gamma} &= \Omega'_{\gamma\gamma} (1 - \beta^2)^{1/2} = 1/2E (p_{x\gamma}^2 - p_{ix\gamma}^2)\end{aligned} \quad |1|$$

где E_{γ} , E_{γ} - значения энергий начального и конечного уровня поперечного движения каналирующей частицы ($\beta = v/c$, $p_{x\gamma}^2 = 2mE_{\gamma}$, использована система единиц, в которой $c = \hbar = 1$),

Как результат, в спектре излучения каналирующей частицы, вследствие преломления излучаемого фотона, возникает сложный эффект Доплера. В общем случае спектр излучаемых частот определяется неравенством:

$$Re q_{\gamma\gamma} = \omega - \omega \beta n(\omega) \cos \theta - \frac{p_{x\gamma}^2 - p_{ix\gamma}^2}{2E} \leq \delta(\omega) \quad |2|$$

В рентгеновской области спектра вдали от характерных атомных частот $\text{Re } n(\omega) \approx 1 - \omega_p^2 / 2\omega^2$ / ω_λ - плазменная частота орбиты/. Как следствие /2/ можно записать следующим образом:

$$\omega_{\gamma\eta}^{(1,2)} = \frac{[\Omega_{\gamma\eta} + |s| \delta(\omega_{\gamma\eta})] \pm \left\{ [\Omega_{\gamma\eta} + |s| \delta(\omega_{\gamma\eta})]^2 - 2\omega_\lambda^2 (1 - \beta \cos \theta) \right\}^{1/2}}{2(1 - \beta \cos \theta)} \quad /3/$$

где $|s| \leq 1$, θ - угол между волновым вектором фотона \vec{k} и осью z

В случае поглощающей среды, для которой $(\omega \text{Im } n(\omega))^{-1} \ll L$ / L - толщина кристалла/, величина $\delta(\omega_{\gamma\eta})$ равна

$(\omega \text{Im } n(\omega) \cos \theta)$. Если выполняется противоположное неравенство, то вместо $\delta(\omega_{\gamma\eta})$ должна быть поставлена величина k^{-1} . Если важен процесс многократного рассеяния, т.е. выполняются условия $k^{-1} < \frac{\omega E_s}{2E_s^2} \frac{L_{\text{раг}}}{L_{\text{раг}}}$ / $L_{\text{раг}}$ - радиационная длина, $E_s = m(45137)^{1/2}$, $L_{\text{ког}}$ - когерентная длина излучения/, то вместо $\delta(\omega_{\gamma\eta})$ в /3/ должна быть подставлена величина $\left[\frac{k}{E_s} \left(\frac{2L_{\text{раг}}}{\omega} \right)^{1/2} \right]^{-1}$.

Из /3/ видно, что при $\delta(\omega_{\gamma\eta}) \neq 0$ излучение фотонов возможно не только при $\Omega_{\gamma\eta} > 0$, но и в случае $\Omega_{\gamma\eta} < 0$. Согласно /1/, это означает возможность излучения, сопровождающегося переходом самой излучающей частицы на более высокий энергетический уровень поперечного движения.

Излучение частот с одновременным возбуждением частицы возможно, согласно /3/, при выполнении условия:

$$|s| \delta(\omega_{\gamma\eta}) > |\Omega_{\gamma\eta}| + \sqrt{2} \omega_\lambda (1 - \beta \cos \theta)^{1/2}$$

Итак, ограничение когерентной длины излучения, например, вследствие поглощения, ограниченности кристалла или процесса

многократного рассеяния, приводит к возможности излучения, системы, даже с $n < 1$ для источника, движущегося со скоростью меньше скорости света в вакууме.

Возбуждение осциллятора при излучении происходит также в условиях аномального эффекта Доплера. В этом случае необходимо, чтобы частица двигалась со скоростью большей скорости света в среде, т.е. необходимо, чтобы показатель преломления был больше единицы.

Как было показано А.В.Колпаковым показатель преломления для рентгеновских фотонов может стать больше единицы в среде, состоящей из атомов, ядра которых имеют низлежащие резонансы /например, Fe^{57} /. Т.к. при записи уравнения /2/ не был использован явный вид показателя преломления, то /2/ описывает также аномальные доплеровские частоты. Для их нахождения необходимо подставить $n(\omega)$ в мессбауэровской среде:

$$\operatorname{Re} n(\omega) = 1 - \frac{\omega_A^2}{2\omega^2} - \mu \frac{(\omega - \omega_0)}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2/4} \quad /4/$$

где $\mu = \frac{g_A}{2\omega_0^2} \frac{2J+1}{2J_0+1} \frac{\Gamma}{1+\alpha_\gamma} f_M$, f_M - фактор Лемба-Мессбауэра, J и J_0 - спины конечного и начального состояний ядра, α_γ - коэффициент внутренней конверсии, ω_0 - резонансная частота ядерного γ -перехода, Γ - ширина ядерного уровня. Используя /2/ и /4/ получаем выражения для аномальных доплеровских частот:

$$\omega_{\gamma\eta}^{(1,2)} = \omega_0 - \mu/2A \pm [(\mu/2A)^2 - \Gamma^2/4]^{1/2} \quad /5/$$

где $A = \frac{\theta^2}{2} + \frac{m^2}{2E^2} + \frac{\omega^2}{2\omega_0^2} + \frac{15Z^2/2}{\omega_0}$.

В области вдали от частоты ω_0 вкладом резонансного члена в /2/ можно пренебречь. В результате мы возвращаемся к рассмотренному ранее случаю излучения нормальных доплеровских частот /см. /3/ /.

Согласно /5/, излучение аномальных доплеровских частот возможно при энергиях частицы $E < E' = m |\Omega_{\gamma\gamma}|$:

$$\cdot [\sqrt{2} \omega_0 (M/c - \theta^2/2 - \omega^2/2\omega_0^2)]^{-2}$$

Все вышесказанное о спектре излучения частицы в режиме плоскостного каналирования относится и к случаю осевого каналирования. В этом случае каналирующая частица может быть сопоставлена с двумерным осциллятором, собственная частота которого в системе покоя частицы равна:

$$\begin{aligned}\Omega'_{\gamma\gamma} &= E_x - E_y = \frac{1}{2}m (\rho_{\dot{x}y}^2 - \rho_{\dot{x}z}^2) \\ \Omega_{\gamma\gamma} &= \Omega'_{\gamma\gamma} (1 - \beta^2)^{1/2} = \frac{1}{2}E (\rho_{\dot{x}y}^2 - \rho_{\dot{x}z}^2)\end{aligned}$$

В §2 указано также, что оптическая анизотропия кристалла сказывается на характеристиках рассматриваемого излучения, вследствие того, что среда в этом случае обладает несколькими показателями преломления.

Вторая и третья главы диссертации посвящены построению количественной теории когерентного рентгеновского и γ -излучения каналирующих частиц.

Для расчета сечения излучения фотонов каналирующей частицей необходимо знать волновые функции каналирующего позитрона /электрона/.

В связи с этим, в §3 второй главы найдено точное решение квадратированного уравнения Дирака с периодическим одно-

мерным потенциалом $V(x)$. В §4 найденное решение сравнивается с известным решением в приближении Фэрри-Воммерфельда-Мауэ. На основе непосредственного сопоставления точного и приближенного решения показано, что в случае каналирования приближение Фэрри-Воммерфельда-Мауэ применимо при энергии частицы $E \sim 1$ ГэВ даже для достаточно толстых кристаллических мишеней $l \leq 1$ см.

При нахождении волновых функций ультрарелятивистской частицы, падающей почти перпендикулярно к поверхности кристалла не учитывались волны отраженные от поверхности кристалла.

Однако если угол падения частиц на кристалл сравним с углом их полного зеркального отражения от поверхности кристалла, учет отраженных волн становится принципиально важным. В §5 рассмотрено зеркальное отражение каналирующих частиц от поверхности монокристалла. Найдена амплитуда зеркально отраженной волны A_0 и показано, что амплитуда A_0 в условиях каналирования может быть представлена в виде суперпозиции амплитуд, описывающих зеркальное отражение от среды, "показатель преломления" которой $n_{\gamma} = \frac{p_{0y}(p_{0x})}{p_{0z}}$ зависит от номера зоны в которую захватывается в кристалле падающая частица. p_0 - импульс падающей частицы, p_{0y} - определяется из закона сохранения энергии волны при упругом взаимодействии с кристаллом, т.е. $p_{0y} = (p_0^2 - p_y^2 - p_z^2)^{1/2}$. Показано, что полученные результаты согласуются с экспериментальными результатами по отражению ионов Al от кристалла Si в условиях каналирования. Указано, также, что рассмотренное явление носит общий

характер и должно иметь место также для поверхностного каналирования легких частиц /электронов, позитронов/.

Третья глава посвящена непосредственному расчету сечения когерентного излучения рентгеновских фотонов и мягких γ -квантов каналирующими частицами.

В §6 приведено общее выражение для сечения излучения поляризованных фотонов неполяризованным позитроном /электроном/ и получены в явном виде волновые функции каналирующей частицы в приближении Фарри-Зоммерфельда-Мауэ в конечном кристалле.

В §7 находится дифференциальное сечение излучения вдали от условия дифракции, которое в общем случае имеет вид:

$$\begin{aligned}
 d\sigma_s = & \frac{e^2 S_2 d^3 k}{4\pi^2 \omega E^2} \left\{ \frac{(\vec{e}_s \vec{p})^2}{q_z^2} + \frac{(\vec{e}_s \vec{p}_s)^2}{q_z^2} + (\vec{e}_s \vec{p}) 2 \operatorname{Re} \sum_{\gamma\bar{\gamma}} Q_{\gamma\bar{\gamma}} (\vec{e}_s \vec{W}_{\gamma\bar{\gamma}}) \right. \\
 & \cdot \frac{e^{i q_{z\gamma} L}}{q_z} \left[\frac{1 - e^{-i q_{z\gamma} L}}{q_{z\gamma}} - \frac{1}{q_z} \right] + \operatorname{Re} \sum_{\gamma\bar{\gamma}} Q_{\gamma\bar{\gamma}} (\vec{e}_s \vec{W}_{\gamma\bar{\gamma}}) \cdot \\
 & \cdot (\vec{e}_s \vec{W}_{\gamma\bar{\gamma}}^*) e^{i(p_{z\gamma} - p_{z\bar{\gamma}}) L} \frac{(1 - e^{-i q_{z\gamma} L})}{q_{z\gamma}} \left[\frac{(1 - e^{-i q_{z\bar{\gamma}} L})}{q_{z\bar{\gamma}}} - \right. \\
 & \left. - \frac{2}{q_z} \right] - \frac{2 (\vec{e}_s \vec{p}_s) (\vec{e}_s \vec{p}_s)}{q_z^2} \sum_{\gamma\bar{\gamma}} Q_{\gamma\bar{\gamma}} I_{\gamma\bar{\gamma}} e^{i(p_{z\gamma} - p_{z\bar{\gamma}}) L} \left. \right\}
 \end{aligned}$$

где $Q_{\gamma\bar{\gamma}} = C_{\gamma} \left(\frac{2\sqrt{L}}{a} \right) C_{\bar{\gamma}}^* \left(\frac{2\sqrt{L}}{a} \right)$; $Q_{\gamma\gamma} = C_{\gamma} \left(\frac{2\sqrt{L}}{a} \right) C_{\gamma}^* \left(\frac{2\sqrt{L}}{a} \right)$

n, ℓ находятся из условий $|p_x - \frac{2\sqrt{\ell}}{a}| < \frac{\sqrt{\ell}}{a}$, $|p_x - k_x - \frac{2\sqrt{\ell} n_0}{a}| < \frac{\sqrt{\ell}}{a}$.

$$\vec{W}_{\gamma\gamma} = \vec{p}_n J_{\gamma\gamma} - \vec{n}_x I_{\gamma\gamma}; \quad \vec{p}_n(\ell) = \vec{p} - \vec{n}_x \left(\frac{2\sqrt{\ell} n_0(\ell)}{a} \right)$$

\vec{n}_x - единичный вектор по оси X.

$$J_{\gamma\gamma} = \int_0^a e^{-i \frac{2\sqrt{\ell}}{a} (\ell - n_0) x} \mathcal{U}_{\gamma p_x}(x) \mathcal{U}_{\gamma p_x}^*(x) dx;$$

$$I_{\gamma\gamma} = \frac{1}{i} \int_0^a e^{-i \frac{2\sqrt{\ell}}{a} (\ell - n_0) x} \mathcal{U}_{\gamma p_x}(x) \frac{d}{dx} \mathcal{U}_{\gamma p_x}^*(x) \Big|_{x=0}^a dx;$$

$$C_{\gamma} \left(\frac{2\sqrt{\ell}}{a} \right) = \frac{1}{\sqrt{a}} W_{\gamma}^* \left(\frac{2\sqrt{\ell}}{a} \right); \quad W_{\gamma} \left(\frac{2\sqrt{\ell}}{a} \right) = \int_0^a e^{-i \frac{2\sqrt{\ell}}{a} x} \mathcal{U}_{\gamma p_x}(x) dx$$

а также при $\omega \ll E$, $\theta \ll 1$ / θ - угол между волновым вектором фотона \vec{k} и осью z /.

$$q_z = p_z - p_{z2} - k_z = \frac{\omega}{2} \left(\frac{m^2}{E^2} + \theta^2 \right);$$

$$q_{\parallel\gamma} = p_{z\gamma} - p_{z2\gamma} - k_z k = \frac{\omega}{2} \left(\frac{m^2}{E^2} + \theta^2 \right) - \frac{p_{z\gamma}^2 - p_{z2\gamma}^2}{2E} - k_z (k-1)$$

Из /6/ видно, что в выражение для сечения излучения действительно входят члены с $\gamma \neq \gamma$, описывающие излучение, обусловленное спонтанными переходами между уровнями спектра поперечного движения каналирующей частицы. Если $\mathcal{U}_{\gamma, \gamma}(\vec{p})$ считать зависящим от \vec{p}_1 и \vec{k}_1 , то /6/ описывает сечение излучения позитрона в режиме осевого каналирования.

Согласно /6/ излучение имеет эллиптическую поляризацию

периодически зависящую от толщины кристалла. Период осцилляций сечения определяется величиной $\rho_{\alpha\gamma} - \rho_{\beta\gamma} = \frac{1}{2}E(\rho_{\alpha\gamma}^2 - \rho_{\beta\gamma}^2)$; т.е. фактически частотой колебаний осциллятора в лабораторной системе координат. Оценка величины членов в /6/ дает для интенсивности предсказанного в диссертации нового типа излучения образованного позитронами с $E \sim 1\Gamma\text{эВ}$, $\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim 10^{-3}$, $\Delta\theta \sim 10^{-3}\text{ рад.}$, $l \sim 10^{-2}\text{ см.}$, $N = \frac{dE}{\Delta E} \sim 10^6$ квантов на позитрон для рентгеновских фотонов, $\sim 10^{14} - 10^{15}$ квантов на позитрон для мессбауэровских кристаллов.

Количественный расчет сечения /6/ выполнен для модельного потенциала Кроинга-Пенни. Показано, что в предельном случае выхода из условия каналирования, члены с $\gamma \neq \eta$ пропадают и основной вклад в сечение рентгеновского излучения частицы будет вносить переходное излучение.

В §8 найдено дифференциальное сечение излучения в условиях динамической дифракции. Подробный анализ сделан на примере случая Брэгга ($\kappa_z > 0$, $\kappa_z + 2\sqrt{B_z} < 0$), что, например, соответствует случаю дифракции фотона на семействе кристаллографических плоскостей, описываемых вектором обратной решетки $2\sqrt{B}$, направленным антипараллельно оси z , т.е. $2\sqrt{B_z}$. Показано, что в этом случае излучение будет распространяться в узкий дифракционный конус вдоль оси z .

Спектр излучаемых частот в этом случае дается формулой

$$\omega_{j\eta}^{(4,2)} = \frac{\left(\frac{\rho_{\alpha\gamma}^2 - \rho_{\beta\gamma}^2}{2E}\right) + |\delta|\delta(\omega_{j\eta})}{\frac{1}{2}\left(\frac{m^2}{E^2} + \theta^2\right) - \frac{1}{\gamma} \text{Re } \delta^{4,3}} \quad /7/$$

где

$$\epsilon_{4,23} = \frac{1}{4} \left\{ g_{00} + \beta g_{11} - \beta \alpha \pm [(g_{00} + \beta g_{11} - \beta \alpha)^2 - 4\beta(\alpha g_{00} - g_{01}g_{10} + g_{10}^2 g_{11}^2)]^{1/2} \right\};$$

$$\beta = \frac{(\vec{K}, \vec{v})}{(K + 2\beta B, v)} \quad \alpha = \frac{2(K, 2\beta B) - (2\beta B)^2}{\omega^2}$$

g_{23} - определяется разложением в ряд по векторам обратной решетки диэлектрической проницаемости кристалла, являющейся периодической функцией.

Из /7/ видно, что спектр частот существенно зависит от преломляющих свойств кристалла в условиях дифракции. Вследствие резкого изменения поглощения при динамической дифракции, когерентная длина, ограниченная $(\omega \text{Im} \epsilon^{(2)})^{-1}$, может возрасти, что приведет к возрастанию интенсивности излучения по сравнению с отсутствием дифракции.

Показано также, что явление дифракции приводит не только к изменению характеристики излучения вдоль направления движения частицы /см. /7/, но и приводит к возникновению излучения под большими углами относительно импульса падающей частицы в направлении дифракции $\omega_m K + 2\beta B$ /например, в случае Лауэ с $K_2 > 0$, $K_2 + 2\beta B_2 > 0$).

Радиационные переходы между уровнями спектра поперечного движения частицы, приводят к существенному перераспределению первоначальной заселенности уровней. В §9 проанализировано влияние радиационных переходов на движение частицы и ее излучение в кристалле. Предсказано явление радиационного охлаждения пучков заряженных ультрарелятивистских частиц при

пролете через кристалл в условиях каналирования. Приведена оценка времени жизни частицы на уровне n в потенциальной яме канала. Показано, что при пролете позитрона с $E \sim 1$ ГэВ через кристалл толщиной $L \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ см заселенность верхнего возбужденного уровня n_{max} упадет в e раз.

Четвертая глава диссертации посвящена рассмотрению излучения электронов с достаточно небольшой энергией 1-10 МеВ. Показано, что и при таких энергиях частицы возможны интерференционные эффекты в дифференциальном сечении излучения, вследствие трансляционной симметрии кристалла. Из анализа законов сохранения показано, что интерференционные эффекты в дифференциальном сечении излучения электрона в кристалле возможны для всех энергий с $p \geq 1/2 (2\pi T_{min})$. В IO и II параграфах проведено рассмотрение тормозного излучения электронов указанной энергии в борновском и эйкональном приближениях. Показано, что полученное сечение процесса находится в согласии с наблюдаемыми дифференциальными спектрами излучения, полученными группой Ю.С.Коробочки.

В последнем параграфе найдено общее выражение для сечения излучения электрона с энергией 1-10 МеВ в кристалле и проведено сравнение вкладов в интенсивность от различных видов излучения. Показано, что интенсивность параметрического рентгеновского излучения в этом случае сравнима с интенсивностью тормозного излучения.

В заключении диссертации приведены основные результаты исследования:

I. Показано, что радиационные переходы между уровнями поперечного движения ультрарелятивистской частицы, каналирую-

шей в кристалле, приводят к возникновению нового типа квазимонохроматического рентгеновского и γ -излучения. Показано, что указанное излучение возникает как для отрицательно заряженных частиц /электронов/, так и для положительно заряженных частиц /позитронов/.

2. Показано, что частица, в условиях каналирования, может быть сопоставлена с движущимся в среде осциллятором, собственная частота которого в системе покоя зависит от энергии. При излучении каналирующей частицы в кристалле возможно наблюдение сложного и аномального эффектов Допплера в рентгеновской области спектра фотонов.

3. Показано, что излучение, сопровождающееся возбуждением самой излучающей частицы, возможно не только вследствие аномального эффекта Допплера или при движении источника со скоростью большей скорости света в вакууме, но также в среде с $n < 1$ при движении источника со скоростью $v < c$, вследствие ограничения когерентной длины излучения из-за наличия границ кристалла, поглощения фотонов в среде, процесса многократного рассеяния.

4. Предсказано явление радиационного охлаждения пучков каналирующих ультрарелятивистских заряженных частиц.

5. Дана квантовая теория излучения рентгеновских фотонов и γ -квантов каналируемыми ультрарелятивистскими частицами. На основе непосредственного сравнения точного решения уравнения Дирака с периодическим одномерным потенциалом и решения уравнения в приближении Фэрри-Зоммерфельда-Мауэ показана применимость указанного приближения для расчета сечения излучения при толщинах мишени $L \ll 1$ см. при энергии

позитрона $E \sim 1 \text{ ГэВ}$. Найдено сечение рассматриваемого процесса в кристалле конечной толщины. Показано, что полное сечение процесса испытывает осцилляции с изменением толщины кристалла. Показано, что спектр излучения в данном угловом интервале формируется набором дискретных линий.

6. Показано, что оптическая анизотропия вещества приводит к изменению спектральных и поляризационных свойств излучения и позволяет, например, исследовать амплитуду рассеяния γ -кванта на поляризованном ядре.

7. Показано, что дифракция излучаемых рентгеновских фотонов в кристалле приводит к существенному изменению спектральных и угловых распределений рассматриваемого излучения. Дана теория излучения фотонов каналирующей частицей в условиях дифракции.

8. Указано на возможность индуцированного излучения фотонов пучками каналирующих частиц под действием внешнего электромагнитного поля.

9. Предложено объяснение опытов по анизотропии зеркального отражения частиц от поверхности монокристаллов.

10. Показано, что вследствие трансляционной симметрии кристалла, возможно образование интерференционных пиков в дифференциальном спектре тормозного излучения и для электронов сравнительно низких энергий: $E \sim 1 - 10 \text{ МэВ}$. Расчитано сечение тормозного и параметрического излучений рентгеновских фотонов электронами в области указанных энергий.

ПУБЛИКАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты диссертации опубликованы в следу-

щих работах:

1. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская, И.Д.Феранчук. О параметрическом рентгеновском излучении электронов низких энергий ($E \sim 1$ МэВ) в монокристаллах. Труды УП Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. Изд. Московского государственного университета, 185-189, 1976.

2. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Сложный и аномальный эффекты Доплера для каналирующего позитрона (электрона). Доклады Академии наук СССР, 231, 1335-1338, 1976.

3. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Волновые функции релятивистского электрона (позитрона) в режиме плоскостного каналирования. Тезис докладов УИ Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. М., Изд. Московского государственного университета, стр.50, 1976.

4. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Когерентное излучение каналированных электронов (позитронов) в рентгеновском диапазоне спектра. Тезис докладов УИ Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. М., Изд. Московского государственного университета, стр. 51, 1976.

5. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Поверхностное каналирование заряженных частиц. Тезис докладов УИ Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами, М., Изд. Московского государственного университета, стр.17, 1976.

6. V. G. Baryshevskii, I. Ya. Dubovskaya. Coherent Radiation of the Channeling Positron (Electron). *Physica Status Solidi*, 22(6), 403-412, 1977.

7. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Поверхностное каналирование заряженных частиц. Физика твердого тела, 19, 597-599, 1977.

8. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Когерентное излучение и радиационная коллимация пучков заряженных частиц, движущихся в кристалле. Письма в Журнал технической физики, 3, 500-502, 1977; поправку см. 3, 1100, 1977.

9. V. G. Baryshevsky, I. Ya. Dubovskaya. Radiation Cooling of Charged Beams. *Physics Letters*, A62, 45-47, 1977

10. И.Я.Дубовская. Когерентное тормозное рентгеновское излучение электронов в тонких монокристаллах. Вестник БГУ, вып. I, сер. I, 54-58, 1977.

11. В.Г.Барышевский, И.Я.Дубовская. Когерентное кулоновское возбуждение поляризованных ядер. Тезисы докладов XXII Сопещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, стр. 399, Изд. "Наука", Ленинград, 1977.

12. В.Г.Барышевский, А.О.Грубич, И.Я.Дубовская. К теории когерентных процессов в кристалле с участием каналированных частиц, 318-78, Депонирование в ВИНТИ от 26 января 1978.

АТ 14079. Подписано к печати 13.03.78. Формат 60 84 I/I6
Объем печ.л. 125. Тираж 100 экз. Заказ 887. Бесплатно
Отпечатано на ротапринтере греста "Белоргводстрой" Минводхоза БССР
г. Минск, ул. Коммунистическая, д. II.



000000: 552244