

На правах рукописи

Яровой Артемий Тимофеевич

**Теоретическое исследование угловых профилей
синхротронного излучения.
Новые результаты.**

01.04.02 – теоретическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2006

Работа выполнена на кафедре квантовой теории поля
Томского Государственного Университета

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой теории поля Томского Государственного Университета

Багров Владислав Гавриилович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Томского Государственного Университета

Бордовицын Владимир Александрович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Томского Государственного Педагогического Университета

Эпп Владимир Яковлевич

Ведущая организация

ФГНУ Научно-исследовательский институт ядерной физики, г. Томск

Защита состоится 21 сентября 2006 г. в 16 час.30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 при Томском государственном университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета

Автореферат разослан “___” _____ 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Ивонин И.В.

1 Актуальность и научная новизна

Несмотря на огромное количество проведенных теоретических и экспериментальных исследований свойств синхротронного излучения (далее СИ), в данной области еще остались белые пятна. В частности, большой теоретический интерес представляет детальное исследование геометрических свойств угловых распределений интенсивности СИ как функции энергетических параметров.

Так, например, при рассмотрении модельной задачи - исследование влияния сингулярностей электромагнитного поля на характеристики СИ было впервые обнаружено, что свойства угловых распределений отдельных спектральных компонент СИ проявляют противоположные тенденции, нежели чем полное, просуммированное по спектру излучение¹. Обнаруженное шло в разрез с устоявшимся на тот момент мнением и поэтому привлекло особое внимание исследователей. Данная работа¹ стала отправной точкой для проведения детальных исследований обнаруженного эффекта и инициировала решение целого ряда задач, легших в основу настоящей диссертационной работы.

2 Цели и задачи работы

Целью настоящей диссертационной работы является исследование новых, неизвестных ранее свойств синхротронного излучения. В соответствии с общей целью работы были поставлены следующие задачи:

1. Исследование и описание поведения функций угловых распределении полного (просуммированного по спектру) СИ всех поляризаций методами классической теории.
2. Исследование свойств концентрации СИ для просуммированного по спектру излучения.
3. Определение свойств деконцентрации отдельных спектральных компонент СИ. Изучение этих свойств с помощью квантовой теории.
4. Определение меры отличия описаний СИ по классической и квантовой теории. Исследование ее поведения при изменении характеристик излучения.
5. Численное исследование квантовых функций углового распределения СИ для бозона и электрона.

¹V.G. Bagrov, D.M. Gitman, A. Levin, V.B. Tlyachev. "Aharonov-Bohm effect in cyclotron and synchrotron radiations" Nucl. Physics. 2001, В 605, p. 425-454.

3 Положения, выносимые на защиту

1. Теоретическое исследование методами классической и квантовой электродинамики угловых профилей спектральных компонент синхротронного излучения. Введены новые характеристики угловых распределений - эффективный угол и угол отклонения. Показано, что для полного (просуммированного по спектру) излучения эффективный угол и угол отклонения с ростом энергии заряда уменьшаются до нуля (что подтверждает ранее известное свойство синхротронного излучения концентрироваться с ростом энергии заряда в узком угловом растворе в окрестности плоскости орбиты). Установлено новое свойство излучения, состоящее в том, что для каждой фиксированной спектральной гармонике эффективный угол и угол отклонения являются возрастающими функциями энергии заряда и стремятся к конечным значениям при бесконечном росте энергии, что соответствует деконцентрации излучения относительно плоскости орбиты. Найдено, что учет квантовых поправок ослабляет деконцентрацию излучения.
2. Теоретическое обоснование существования таких областей углов и энергии частицы, при которых мощность излучения, рассчитанная по квантовой теории, превышает мощность излучения, предсказываемую классической теорией (вопреки существовавшему интуитивному допущению, что таких областей нет, и что квантовая теория всегда дает значения излучаемой мощности, меньшие предсказываемой классической теорией).
3. Предсказание методами квантовой теории существования ненулевого излучения π -компоненты линейной поляризации в плоскости орбиты заряда. Это излучение имеет место только для частиц полуцелого спина (электронов) и целиком обязано переходам с переориентацией спина.

4 Достоверность научных выводов и результатов

Достоверность результатов обусловлена корректным применением классической и квантовой теорий синхротронного излучения, контролируется их внутренней согласованностью и совпадением в ряде частных случаев, оговоренных в тексте диссертации с указанием соответствующих ссылок, с известными опубликованными работами.

5 Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня:

1. 14-я Российская конференция по использованию синхротронного излучения. Новосибирск 15-19 июля 2002г. Новосибирск, ИЯФ СО РАН.
2. Eleventh Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. 21-27 August 2003. Moscow Russia, MSU.
3. XI International Symposium RREPS-03. September 8-11. 2003. Tomsk, Russian Federation. Tomsk Polytechnic University.
4. 15-я Российская конференция по использованию синхротронного излучения. Новосибирск 19-23 июля 2004г. Новосибирск, ИЯФ СО РАН.

6 Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, одного приложения и списка литературы. Диссертация изложена на 98 страницах, включая 51 рисунок, и содержит список литературы из 99 наименований.

7 Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, перечислены полученные новые результаты, представлены положения, выносимые на защиту.

Основной задачей **первой главы** являлось подробное исследование классической функции углового распределения мощности $W_i(\beta, \theta)$ спектральной суммы СИ и ее зависимости от скорости излучающего заряда. В частности, для полного излучения и его поляризаций были построены зависимости угла максимального излучения θ^{max} от скорости $\beta = v/c$, где v — скорость частицы, c — скорость света. При этом в каждом случае решалось уравнение вида

$$\frac{dW_i(\beta, \theta^{max})}{d\theta} = 0, \text{ где индекс } i = 0, 1, 2, 3 \quad (1)$$

означает полное излучение и его поляризации.

В случаях полного излучения и линейных поляризаций уравнение (1) удалось записать в виде некоторых композиций элементарных и специальных

функций. Однако, в силу того, что для спектральной суммы круговых поляризаций замкнутого аналитического выражения до сих пор не найдено, для быстрого расчета направлений максимального излучения вводятся специальные функции $\chi_k(x)$, позволяющие достаточно эффективно численно рассчитать упомянутые характеристики.

Ниже приведены графики, отображающие зависимость углов максимального излучения - $\theta_i^m(\beta)$ от скорости β для полного правополяризованного и π -поляризованного излучения ($\theta_2^m(0 \leq \beta \leq 1) = \pi/2$):

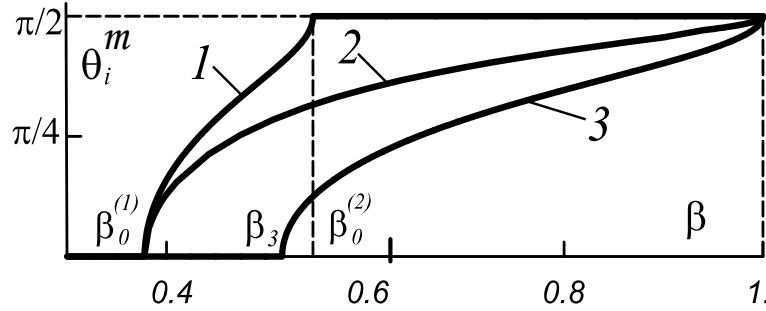


Рис. 1: Графики функций $\theta_i^m(\beta)$: 1 - $\theta_0^m(\beta)$, 2 - $\theta_1^m(\beta)$, 3 - $\theta_3^m(\beta)$.

Из Рис. 1 видно, что все три угла с ростом скорости стремятся к $\pi/2$, таким образом, происходит концентрация спектральной суммы в окрестности плоскости орбиты движения заряда.

Затем, в качестве характеристик степени концентрации излучения вводятся эффективный угол Δ и угол отклонения α . Эти величины численно характеризуют свойство сосредоточенности и концентрации излучения с точки зрения экспериментальных измерений. Геометрический смысл этих величин прост: эффективным углом излучения называется угловой размер минимального раствора, в который излучается половина всей мощности; угол отклонения, показывает угловое расстояние центра этого раствора, до плоскости орбиты заряда. Например, для определения указанных величин как функций скорости β в случае круговой поляризации решается следующая система уравнений:

$$\int_{\theta_2^{(1)}}^{\theta_1^{(1)}} F_1(\beta; \theta) \sin \theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^\pi F_1(\beta; \theta) \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

$$F_1(\beta; \theta_1^{(1)}) \sin \theta_1^{(1)} = F_1(\beta; \theta_2^{(1)}) \sin \theta_2^{(1)},$$

$$\Delta = \theta_2 - \theta_1, \alpha = (\pi - \theta_1 - \theta_2)/2,$$

где $F_1(\beta; \theta)$ - угловое распределение правополяризованного излучения.

Приведем графики эффективного угла и угла отклонения для спектральной суммы. Из Рис.2 и Рис.3 видна тенденция концентрации: эффективный

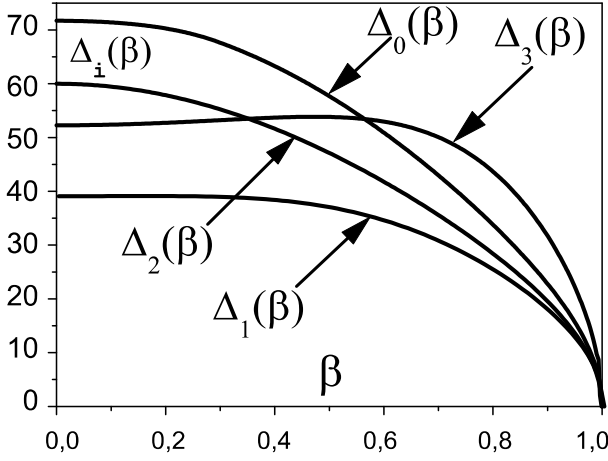


Рис. 2: Зависимость эффективного угла от β для компонент поляризации СИ.

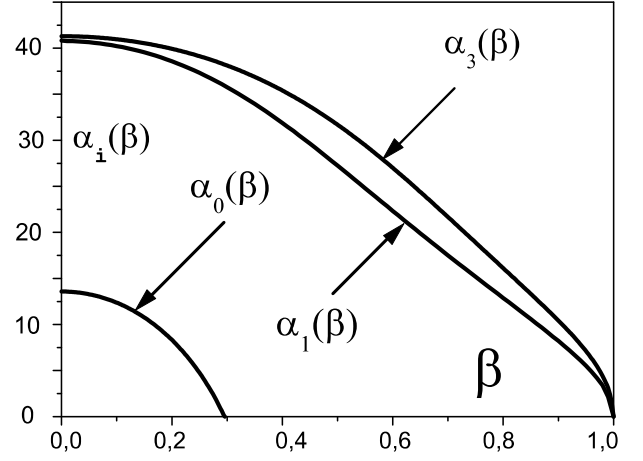


Рис. 3: Зависимость угла отклонения от β для компонент поляризации СИ.

угол и угол отклонения стремятся к нулю при стремлении скорости β к единице, что говорит о концентрации и сосредоточении излучения в бесконечно-малом угловом растворе, положение которого совпадает с направлением плоскости орбиты.

Эффективный угол и угол отклонения для других поляризаций и полного излучения вводятся аналогичным образом, при этом учитывается симметрия распределения относительно плоскости орбиты.

Впервые рассмотрен вопрос о степени круговой поляризации полного излучения. В качестве степени преобладания над/под плоскостью орбиты право-/лево- поляризованного излучения введена специальная характеристика:

$$\eta(\beta) = J^{-1} \int_0^{\pi/2} F_1(\beta, \theta) \sin \theta d\theta, \quad (3)$$

$$J = \int_0^{\pi/2} [F_1(\beta, \theta) + F_{-1}(\beta, \theta)] \sin \theta d\theta = \gamma^4/3,$$

где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ - релятивистский фактор. Ее график изображен на Рис.4.

Таким образом, в первой главе на основе введенных количественных характеристик подробно изучено свойство концентрации и сосредоточения СИ и его поляризаций с ростом скорости заряда.

Во **второй главе** основным лейтмотивом является подробное исследование функций угловых распределений для отдельных спектральных составляющих на основе классической теории СИ. При этом целью является определение разницы между свойствами концентрации спектральной суммы и ее отдельных компонент. В §2.2 рассматривается угловое распределение первой

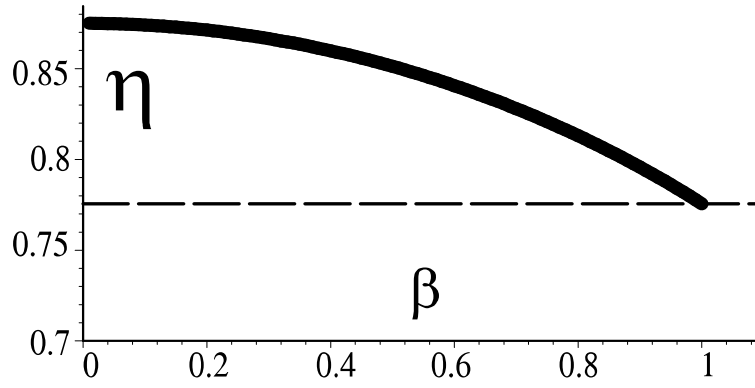


Рис. 4: График функций $\eta(\beta)$

гармоники. Она замечательна тем, что только эта компонента дает ненулевой вклад по мощности в направлениях перпендикулярных плоскости орбиты. Ниже на Рис.5 показаны графики соответствующих функций распределения поляризованного и неполяризованного излучения в случаях $\beta = 0$ и $\beta = 1$. Отсюда видно, что с ростом скорости излучение сосредотачивается в

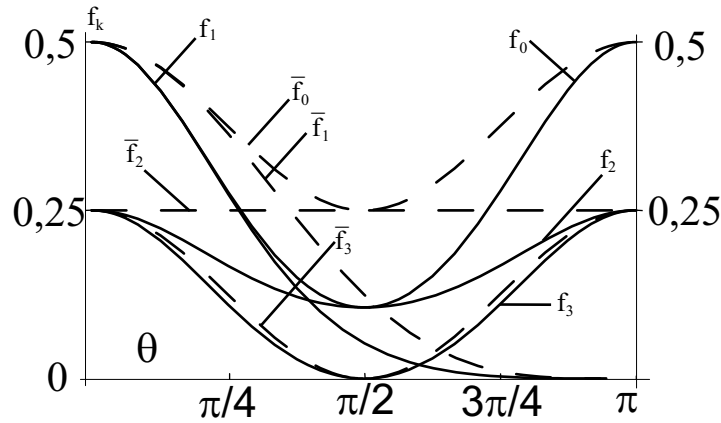


Рис. 5: $\bar{f}_k$ -функции $f_k(1, \beta; \theta)$ при $\beta = 0$; f_k -функции $f_k(1, \beta; \theta)$ при $\beta = 1$

окрестностях неподвижных максимумов $\theta = 0, \pi$. В параграфе §2.3 подробно изучается динамика углов максимального излучения гармоник $\nu > 1$ с ростом скорости заряда. В нем строятся соответствующие графики и рассчитываются асимптотические формулы углов максимального излучения в ультрарелятивистском случае. Эти формулы показывают, что ростом энергии заряда происходит обратный свойствам спектральной суммы процесс - деконцентрация излучения относительно плоскости орбиты. В §2.4 Изучаются зависимости эффективного угла и угла отклонения отдельных спектральных компонент от скорости заряда. Также для этих величин строятся ультрарелятивистские асимптотики. Ниже на Рис. 6 и 7 представлены графики угла отклонения и эффективного угла соответственно для определенных номеров гармоник в сравнении с теми же величинами спектральной суммы:

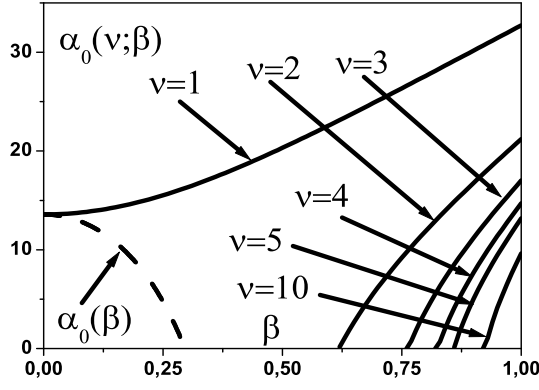


Рис. 6: Зависимость угла отклонения $\alpha_0(\nu, \beta)$ для различных гармоник ν .

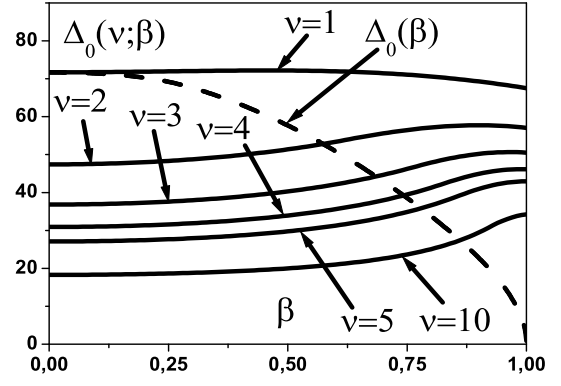


Рис. 7: Зависимость эффективного угла $\Delta_0(\nu, \beta)$ для различных гармоник ν .

В целом на основе представленной информации делается вывод об общей для всех номеров гармоник тенденции к деконцентрации с ростом скорости заряда. Эта тенденция прямо противоположна соответствующему свойству спектральной суммы. Математически этот факт объясняется тем, что спектральный ряд имеет неравномерную сходимость по параметру β , следовательно, свойства отдельных спектральных составляющих могут быть противоположными свойствам общей суммы.

Третья глава посвящена численному исследованию функций углового распределения СИ полученных на основе квантовомеханического расчета. Такой подход отличается от классического тем, что наряду с классическим энергетическим параметром β появляется и чисто квантовый - номер начального энергетического уровня излучающей частицы n , а также в случае излучения электрона начальные и конечные состояния по спину s, s' . Т.о. появление новых “степеней свободы” обогащает структуру и закономерности квантовых угловых распределений по сравнению с классическими. В §3.2 исследуется вопрос и взаимном “расположении” квантовых и классических угловых профилей. Основным результатом такого исследования можно считать вывод о том, что не всегда квантовые профили ограничиваются классическими при соответствующих параметрах, как это считалось раньше. Существуют параметры, при которых профили пересекаются. В качестве примера выступают графики соответствующие излучению бозона Рис. 8 и 9. Для дальнейшего исследования условий пересечения квантовых и классических профилей вводится функция отличия вида:

$$F_i(n|\nu, \beta; \theta, ss' \text{ в случае электрона}) = \frac{f_i^{b/el}(n|\nu, \beta; \theta, ss')}{f_i^{cl}(\nu, \beta; \theta)} \text{ где } i = 0, 1, 2, 3.$$

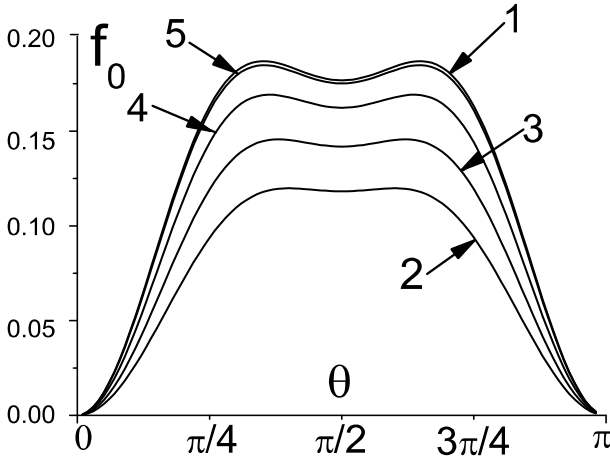


Рис. 8: Профили полного излучения бозона для различных n при $\beta = 0.5$, $\nu = 2$: классика(1); $n = 3(2)$, $5(3)$, $12(4)$, $102(5)$.

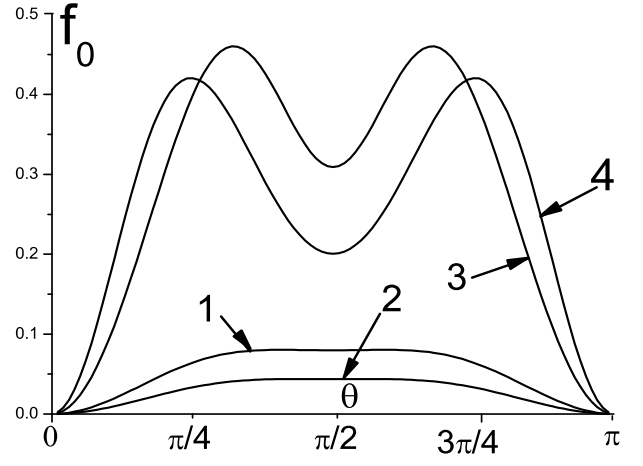


Рис. 9: Профили полного излучения бозона для различных β при $\nu = 3$, $n = 2$: для $\beta = 0, 3$: 1 - классика; 2 - квантовая теория; для $\beta = 1$: 3 - квантовая теория; 4 - классика.

Эта функция является отношением квантовой и классической мощностей. Поведение этой функции исследуется в зависимости от различных параметров излучения. Наиболее интересными характеристиками сравнения являются критическая скорость и критический угол - первая определяется из уравнения $F_i(n|\nu, \beta; \theta = \pi/2) = 1$, второй из $F_i(n|\nu, \beta = 1; \theta) = 1$.

Далее проводится асимптотический анализ критических скорости и угла по ниже указанному алгоритму. На **первом этапе** вычисляется первая квантовая поправка к классической мощности СИ. В случае бозона она равна:

$$\Delta W^{boson}(\nu, \beta, \theta) = \frac{\nu}{2z^2(n + 1/2)} (zl_2 J'_\nu(z) + \nu J_\nu(z) l_3 \cos \theta) \\ (l_2(J'_\nu(z)z^3 - J_\nu(z)(\nu^2 - z^2)^2) + l_3 \nu z \cos \theta (2J_\nu(z)z + J'_\nu(z)(z^2 - \nu^2))), \quad (4) \\ z = \nu \beta \sin \theta.$$

В случае излучения электрона эта величина остается ненулевой только для переходов без переворота спина:

$$\Delta W_\sigma^{s=s'=\pm 1} = \frac{\alpha}{2z} J'_\nu(z) \left(z^3 J'_\nu(z) - J_\nu(z) \left((\nu^2 - z^2)^2 \pm \nu^3 \sqrt{1 - \beta^2} \right) \right), \\ \Delta W_\pi^{s=s'=\pm 1} = \frac{\alpha}{2z} \nu^2 \cos^2 \theta J_\nu(z) \left(2z J_\nu(z) + J'_\nu(z) \left((z^2 - \nu^2) \mp \nu \sqrt{1 - \beta^2} \right) \right), \\ \Delta W_{+1}^{s=s'=\pm 1} = \frac{\alpha}{2z^2} \nu^2 (\nu \cos \theta J_\nu(z) - z J'_\nu(z)) \times \\ \times \left[J_\nu(z) \left(2\nu z^2 \cos \theta + (z^2 - \nu^2)^2 \pm \nu^3 \sqrt{1 - \beta^2} \right) - \right. \\ \left. - z J'_\nu(z) \left((z^2 - \nu^3 \cos \theta) \pm \nu \cos \theta (\nu \sqrt{1 - \beta^2} - z^2) \right) \right], \\ \Delta W_0^{s=s'=\pm 1} = \Delta W_\sigma^{s=s'=\pm 1} + \Delta W_\pi^{s=s'=\pm 1}. \quad (5)$$

На **втором этапе** по построенным первым квазиклассическим поправкам для критических скоростей и углов строятся асимптотики, описывающие случай больших номеров гармоник.

Во второй половине третьей главы обсуждаются спиновые эффекты. В частности, в §3.3 показано, что в случае функции углового распределения π -компоненты для электрона для переходов с переворотом спина излучение в плоскости орбиты не равно нулю, как это происходит в классике и в случае бозона. На Рис. 10 показан график мощности для π -компоненты, излучаемой в плоскости орбиты, как функция скорости заряда β .

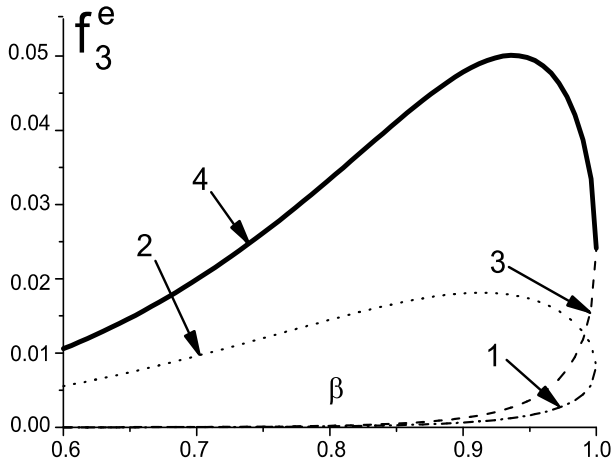


Рис. 10: Интенсивность излучения π -компоненты излучения электрона в плоскости орбиты для $\nu = 2$ и $n = 3$: 1-начальный спин против поля; 2-по полю, и $n = 4$: 3-начальный спин против поля; 4-по полю.

В §3.4 исследуются свойства деконцентрации отдельных гармоник для излучения бозона и электрона. Ниже приведены в графическом виде Рис. 11 и 12 зависимости угла отклонения максимума полного излучения от плоскости орбиты с ростом скорости β .

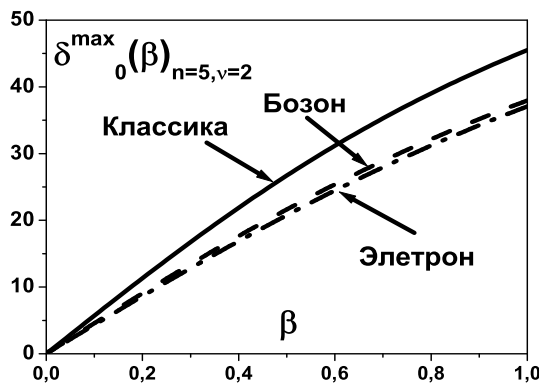


Рис. 11: Зависимость $\delta_0^{max}(\beta)$ для классики, бозона и неполяризованного электрона при $n = 5$, $\nu = 2$.

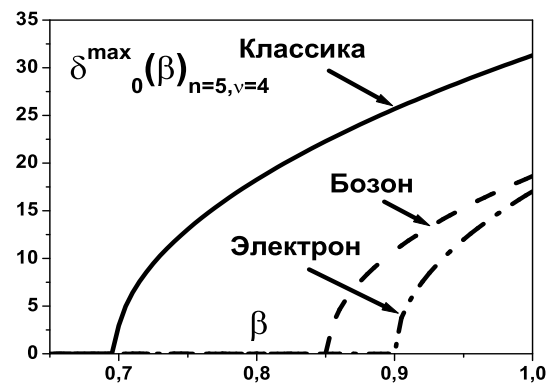


Рис. 12: Зависимость $\delta_0^{max}(\beta)$ для классики, бозона и неполяризованного электрона при $n = 5$, $\nu = 4$.

На основе подобных результатов и для других значений энергетических параметров излучения n и ν можно заключить, что свойство деконцентрации отдельных спектральных квантовых компонент проявляется несколько слабее, чем это происходит в классической теории. И, наконец, было показано, что для π -компоненты неполяризованного электрона поведение функции угла отклонения максимума от плоскости орбиты при определенных значениях параметров n и ν может описываться немонотонной и даже не гладкой функцией, что демонстрируется на Рис. 13. подобное поведение можно счи-

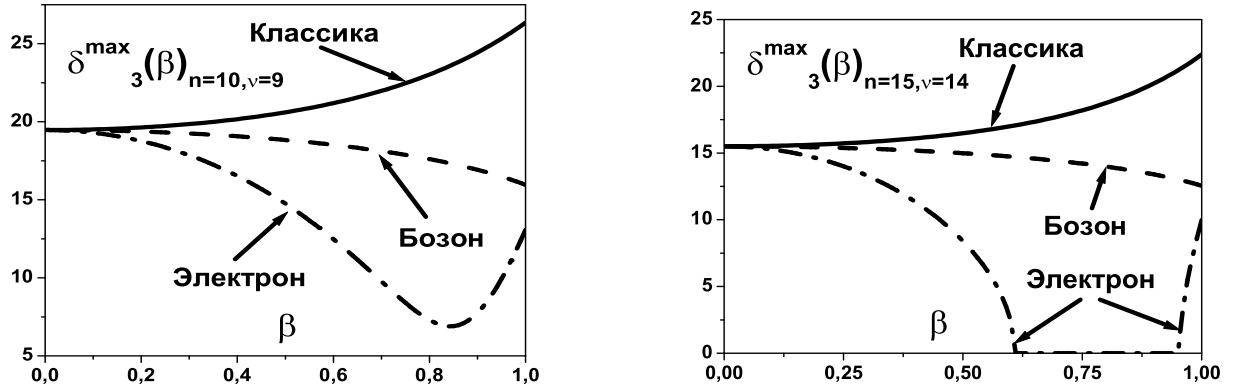


Рис. 13: Зависимость $\delta_3^{\max}(\beta)$ для классики, бозона и неполяризованного электрона: верх слева - $n = 5; \nu = 2$, верх справа - $n = 10; \nu = 2$, низ слева - $n = 10; \nu = 9$, низ справа - $n = 15; \nu = 14$.

тать квантовым эффектом.

В **заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту.

В **приложении** представлены все необходимые формулы для вывода первой квантовой поправки к формуле Шотта для обоих случаев: излучение бозона, излучение фермиона (электрона). В частности, представлены формулы замены аргумента и специальных функций, необходимых для перехода от квантовой мощности излучения к первой поправке.

8 Результаты работы

1. Впервые в теории СИ введены количественные характеристики концентрации излучения, эффективный угол и угол отклонения. Первый показатель определяет область сосредоточенности излучения, второй - степень отклонения этой области от плоскости орбиты излучающей частицы.
2. Для полного излучения и его поляризаций проведено качественное и количественное сравнения свойств концентрации классической спектральной суммы СИ и ее компонент. При этом выяснилось, что спектральные компоненты СИ проявляют свойства, обратные свойствам спектральной суммы. С ростом скорости заряда излучение отдельных спектральных компонент деконцентрируется относительно плоскости орбиты.
3. При численном исследовании угловых профилей СИ, построенных на основе квантовой теории, обнаружено, что существуют определенные области параметров, при которых мощность, рассчитанная по классической теории, меньше мощности, полученной в квантовой теории. На основе найденных первых квантовых поправок к классической мощности СИ проведен асимптотический анализ для величин, описывающих различные аспекты взаимного расположения квантовых и классических профилей.
4. Изучены свойства деконцентрации отдельных спектральных компонент СИ по квантовой теории. На основе введенных характеристик показано, что имеет место квантовое ослабление свойств деконцентрации по сравнению с классической теорией. Для низких уровней энергии и малых гармоник свойство деконцентрации ослабевает.
5. Методами квантовой теории показано, что для спинорных частиц (электронов) имеет место ненулевое излучение π -компоненты линейной поляризации в плоскости орбиты заряда. Такое излучение отсутствует у бесспиновых частиц и не имеет места в классической теории. Установлено, что это излучение обусловлено переходами с переориентацией спина частиц и основной вклад в это излучение вносят электроны с конечной ориентацией спина против внешнего магнитного поля.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] V.G. Bagrov, V.G. Bulenok, D.M. Gitman, V.B. Tlyachev, J.A. Jara, A.T. Jarovoi// Angular Dependence of Synchrotron Radiation Intensity. arXiv:physics/0209097 v1 27 Sep 2002. 13p.
- [2] В.Г. Багров, В.Г. Буленок, В.Б. Тлячев, А.Т. Яровой. "Новые результаты в классической теории синхротронного излучения."// Поверхность. (Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования) 2003. №11, С. 59-65.
- [3] Bagrov V.G., Bulenok V.G., Gitman D.M., V.B. Tlyachev, Jose Acosta Jara, A.T. Jarovoi// Phys. Rev. **Е**. 2004. V. 69. №4-2.P. 046502(1-8).
- [4] В.Г. Багров, М.В. Должин, В.Б. Тлячев, А.Т. Яровой.// "Эволюция углового распределения круговой поляризации СИ при изменении энергии заряда"// Известия вузов. Физика. 2004. т47, №4, С. 68 -77.
- [5] V.G. Bagrov, D.M. Gitman, V.B. Tlyachev, A.T. Jarovoi.// "New theoretical results in synchrotron radiation"// Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **В** 240 (2005) P. 638-645.
- [6] В.Г. Багров, М.В. Должин, А.Т. Яровой.// "Квантовое описание эволюции угловых распределений синхротронного излучения при изменении энергетических параметров заряда."// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2005. №9, С. 5-11.
- [7] М.В. Должин, А.Т. Яровой.// "Сравнительный анализ угловых распределений синхротронного излучения, рассчитанных по классической и квантовой теориям. Излучение бозона."// Известия вузов. Физика. 2005. т48, №8, С. 47 - 51.
- [8] М.В. Должин, А.Т. Яровой.// "Сравнительный анализ угловых распределений синхротронного излучения, рассчитанных по классической и квантовой теориям. Поляризованное излучение бозона."// Известия вузов. Физика. 2005. т48, №12, С. 52 - 58.