

0- 798556

Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет

На правах рукописи



Буримова Анастасия Николаевна

**Сравнительный анализ результатов
классической и квантовой теории
синхротронного излучения слабовозбужденных
заряженных частиц**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре квантовой теории поля

Научные руководители:

доктор физико - математических наук, профессор, Томский государственный университет, заведующий кафедрой квантовой теории поля

Багров Владислав Гаврилович,

доктор физико - математических наук, профессор, Институт ядерной физики университета Сан - Пауло (USP, Бразилия), полный профессор
Гитман Дмитрий Максимович

Официальные оппоненты:

Бордовицын Владимир Александрович, доктор физико - математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра теоретической физики, профессор.

Эпп Владимир Яковлевич, доктор физико - математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный педагогический университет», кафедра теоретической физики, профессор.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится 27 декабря 2012 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.267.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 36 (Главный корпус, аудитория 119).

С диссертацией можно ознакомиться в *Научной библиотеке Томского государственного университета*

Автореферат разослан «23» 11 _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.267.07, д. ф. - м. н.,



Ивонин И.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Синхротронное излучение (СИ) обладает рядом уникальных свойств, благодаря которым широко применяется во многих областях науки и техники. Одной из особенностей СИ является возможность построения его точной теории, которая была с успехом реализована, причем полученные теоретические выводы последовательно подтверждались экспериментом.

В настоящее время в физике ускорителей зачастую используются результаты классической теории СИ. Однако параметры современных ускорителей меняются, приближаясь к области, где квантовые поправки становятся существенными. Таким образом, в рамках традиций исследования СИ, актуальным представляется детальное изучение свойств этого излучения точными методами квантовой теории, предвосхищающее последующие эксперименты на источниках нового поколения. Сравнительный анализ квантовой и классической теорий СИ позволяет определить области параметров, в которых они согласуются, а при помощи численных расчетов можно обнаружить способы повышения репрезентативности классической теории.

Цели работы. Целью диссертационной работы является исследование новых, не известных ранее свойств СИ слабовозбужденных частиц методами квантовой теории и сравнение полученных результатов и известных выводов классической теории, а именно

1. В рамках классической теории введение новых характеристик угловых и спектрально-угловых распределений мощности СИ и модификация известных понятий с целью более детального анализа, а также изучение свойств излучения выделенной части бесконечного классического спектра и численное исследование функций распределения мощности и парциальных вкладов спектральных гармоник.
2. Построение точных аналитических выражений для угловых распределений мощности СИ бесспиновой (бозон) и спиновой (электрон) частиц при квантовых переходах из первого возбужденного состояния в основное, разработка специальных простых математических методов, позволяющих осуществить численный анализ. Оценка влияния спиновых свойств на излучение.
3. Сравнительный анализ результатов классической теории и квантовой теории излучения частиц при переходах с первого энергетического уровня. Аналитическое доказательство несостоятельности классической теории для описания конкретного случая квантовых переходов.



4. Решение задачи о спектральных свойствах излучения квантовой трехуровневой системы для бесспиновой частицы и сопоставление полученных выводов с результатами исследования двухчастотной части классического спектра.
5. Исследование эволюции максимума в квантовом спектре излучения и поиск условия смещения максимума на последнюю гармонику. Нахождение ограничений на область применимости известного в классической теории закона смещения спектрального максимума СИ.

Научная новизна. Теория СИ является самостоятельным развитым замкнутым разделом теоретической физики, и, тем не менее, до сих пор обнаруживает не исследованные или не замеченные ранее вопросы, заслуживающие серьезного внимания. Излучение слабозбужденных частиц изучалось в [8, 9], однако точные аналитические выражения для спектрально-угловых распределений мощности СИ при конкретных переходах в этих работах не были представлены.

Достоинством работы является то, что здесь впервые приведены аналитические доказательства известных ранее выводов квантовой теории СИ, которые, в свою очередь, подтверждены численными расчетами. Так, например, в [11] было показано, что известный в классике вывод об отсутствии π -компоненты линейной поляризации излучения в плоскости орбиты движения частицы противоречит результатам квантовой теории, однако, физическое обоснование этого факта не было предъявлено. Нами такое доказательство было получено.

Сравнительный анализ позволил обнаружить, что классическая теория более адекватно описывает излучение электрона, нежели бесспиновой частицы, что идет разрез с интуитивными выводами о влиянии спиновых свойств на излучение.

Для бесспиновой частицы с точки зрения излучения рассмотрены квантовые переходы из второго возбужденного состояния. Исследована вероятность переходов в первое и основное состояния и, тем самым, решена простейшая задача о свойствах двухчастотного квантового спектра. Впервые методами квантовой теории описана эволюция спектрального максимума и выдвинуты предположения о характере его смещения в область высоких гармоник.

Теоретическая ценность и практическая значимость. Работа носит теоретический характер. Результаты, изложенные в диссертации, являются актуальными и новыми на момент их публикации. Материалы диссертации представляют интерес для специалистов в области теории излучения, физики ускорителей и могут найти применение в астрофизике при изучении физических процессов в дальнем космосе, а также при исследовании излучения в нейтронных звездах и магнетарах, где магнитные поля сравнимы с

полем Швингера.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретическое исследование угловых профилей СИ методами квантовой электродинамики для бесспиновой и спинорной слабовозбужденных частиц. Изучено поведение угловых распределений мощности СИ, а также свойства поляризации излучения. Показано, что при переходах из первого возбужденного состояния с переворотом и без переворота спина компоненты линейной поляризации излучения электрона "меняются местами" и выдвинуто предположение о возможной "смене мест" при других квантовых переходах. Обнаружено, что в зависимости от начального направления спина электрона в ультрарелятивистском пределе происходит вытеснение компонент круговой поляризации друг другом в верхнюю (нижнюю) полуплоскость.
2. Выявление влияния спиновых свойств на излучение слабовозбужденных частиц. Дано аналитическое и численное объяснение того, что электрон со спином, направленным против внешнего магнитного поля, излучает больше чем бозон при любых энергиях, а излучение электрона со спином, сонаправленным с полем, только в релятивистской области превосходит излучение бозона.
3. Теоретическое обоснование ограниченности области применимости классической теории излучения для случая квантовых переходов из первого возбужденного состояния. Численный расчет показал, что не смотря на расхождения, полный классический спектр сопоставим со спинорной частицей, а его первая гармоника – с бесспиновой. Полное согласие классический и квантовый подходы дают лишь в нерелятивистском приближении.
4. Полное аналитическое и численное исследование задачи о двухчастотном квантовом спектре. В частности численными методами показано, что теоретически рассчитанные в квантовой теории характеристики излучения частицы, находящейся во втором возбужденном состоянии, практически совпадают с классическими результатами во всей области значений физических параметров, если считать, что классический спектр содержит только две частоты.
5. Аналитическое и численное обоснование отсутствия концентрации излучения в плоскости орбиты движения ультрарелятивистских квантовых частиц. Вопреки известному для полного классического спектра результату, квантовая теория свидетельствует в пользу конечных ненулевых значений эффективных углов в ультрарелятивистском пределе.

6. В рамках квантовой теории нахождение условий, при которых максимум излучения смещается на последнюю гармонику спектра и последующее численное доказательство возможности такого смещения.

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: International Conference "Quantum Field Theory and Gravity" (5 - 9 июля 2010 г., Центр теоретической физики ТГПУ, Томск), XVIII International Synchrotron Radiation Conference (19-22 июля 2010 г., Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск), The 19th International Spin Physics Symposium (27 сентября - 2 октября 2010 г., Научно-исследовательский центр, Юлих, Германия), 2011 Particle Accelerator Conference PAC'11 (28 мая - 1 апреля 2011 г., Нью Йорк, США), 21st International Congress on X-ray Optics and Microanalysis ICXOM 21 (5 - 8 сентября 2011 г., Кампинас, Бразилия), XIX Национальная конференция по использованию Синхротронного Излучения "СИ-2012" (25 - 28 июня 2012 г., Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск), The 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (9 - 13 июля 2012 г., Лион, Франция), International Conference "Quantum Field Theory and Gravity" (31 июля - 4 августа 2012 г., Центр теоретической физики ТГПУ, Томск)

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 5 работах, из них 2 статьи в издании по перечню ВАК [1, 4], 3 статьи в сборниках трудов конференций [2, 3, 5].

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и библиографии. Общий объем диссертации 110 страниц, включая 104 рисунка. Библиография включает 78 наименований на 9 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены положения, выносимые на защиту. Кроме того, введение содержит объяснения основных понятий и сокращений, которые далее будут использованы, исходный теоретический материал, на котором основаны дальнейшие исследования, и другие полезные комментарии.

В первой главе диссертации приведены выдержки из классической теории СИ. А именно, подробно изучены угловые и спектрально-угловые распределения мощности излучения. Введены функции, определяющие часть излучения типа поляризации i распространяющегося в конкретном направлении (заданном углом θ) - $p_i^{cl}(\beta, \theta)$, где $\beta = v/c$, v - классическая скорость частицы,

c - скорость света, а также функции, задающие степень поляризации излучения в этом направлении - $q_i^{cl}(\beta, \theta)$. Помимо характеристик полного классического спектра изучались также угловые профили его отдельных гармоник. Особое внимание было уделено излучению на основной (первой) гармонике, в виду необходимости производить сравнение с квантовым одночастотным спектром в дальнейшем.

Определение парциального вклада конкретной гармоники, данное в [10] было изменено - в отличие от [10], одновременно нами производился учет поляризационных свойств. Парциальным вкладом мы назвали отношение количества излучения определенного типа поляризации, приходящегося на выбранную гармонику ν , к полной (суммирование производится как по спектральным компонентам, так и по компонентам поляризации) излучаемой мощности. При помощи введенных функций получено подтверждение известных выводов классической теории, например, о том, что вклад основной гармоники в общее излучение с ростом β убывает до нуля для всех типов поляризации. Также показана неоднозначность двойного предела ($\beta \rightarrow 1, \theta \rightarrow \pi/2$) для функций $p_i^{cl}(\beta, \theta)$: в ультрарелятивистском пределе $p_i^{cl}(\beta \rightarrow 1, \theta) = 0$, тогда как рассматривая поведение функций $p_i^{cl}(\beta, \theta)$ в плоскости орбиты, а затем устремляя β к 1, конечного предела мы не получим. Поведение функций $p_i^h(\nu = 1, \beta, \theta)$, характеризующих угловое распределение излучения на первой гармонике, существенно отличается от поведения $p_i^{cl}(\beta, \theta)$. Для полного (суммированного по спектру) излучения, испускаемого в направлении магнитного поля ($\theta = 0$), вклад $p_i^{cl}(\beta, \theta \rightarrow 1)$ уменьшается с ростом энергии частицы. Однако для основной гармоники наблюдается противоположная тенденция. Кроме того, для первой гармоники относительное количество полного (суммированного по компонентам линейной или круговой поляризации) излучения, испускаемого в плоскости орбиты ($\theta = \pi/2$), с ростом β уменьшается, но не достигает нулевого значения, как это происходит в случае полного классического спектра.

В отличие от функций $p_i^h(\nu = 1, \beta, \theta)$, функции $q_i^h(\nu = 1, \beta, \theta)$, задающие степень поляризации излучения в направлении θ на первой гармонике, ведут себя схожим с $q_i^{cl}(\beta, \theta)$ образом. Это означает, что излучение на основной гармонике в заданном направлении обладает теми же поляризационными свойствами, что и полное (суммированное по спектру) излучение. В нерелятивистском пределе значения $q_i^h(\nu = 1, \beta, \theta)$ и $q_i^{cl}(\beta, \theta)$ совпадают, однако, следует отметить, что в плоскости орбиты такое свойство наблюдается при всех энергиях: $q_i^h(\nu = 1, \beta, \pi/2) = q_i^{cl}(\beta, \pi/2)$.

В первой главе нами также введено понятие n -части спектра. Под n -частью спектра подразумеваем выделенные частоты бесконечного классического спектра с $\nu = 1$ до $\nu = n$ включительно. Для дальнейших исследований мы подробно рассмотрели 2-часть спектра, то есть первые две его гармоники

- основную ($\nu = 1$) и следующую за ней ($\nu = 2$). Логичным представляется распространение введенных характеристик СИ на понятие выделенной части спектра, то есть исследование спектрально-углового распределения и поляризационных свойств укороченного двухчастотного спектра в рамках классической теории. В связи с этим в числе прочих были введены функции $\bar{q}_i^h(n, \nu, \beta)$, определяющие степень поляризации излучения выделенной части спектра.

Во второй главе в рамках квантовой теории исследуются особенности излучения частиц, находящихся в первом возбужденном состоянии. Отдельно рассмотрены свойства излучения бесспиновой и спинорной частиц. Для бозона и электрона в явном виде выписаны точные аналитические выражения для угловых распределений мощности излучения и введены аналоги классических характеристик $q_i^b(\beta)$, $p_i^b(\beta, \theta)$, $q_i^b(\beta, \theta)$ и $q_i^e(\zeta, \beta)$, $p_i^e(\zeta, \beta, \theta)$, $q_i^e(\zeta, \beta, \theta)$ (параметр ζ характеризует направление спина электрона: $\zeta = 1$ соответствует спину, направленному "по полю", $\zeta = -1$ - спину, по направлению противоположному внешнему полю). При изучении выражений, описывающих угловое распределение излучения электрона, была обнаружена интересная особенность: угловое распределение σ -компоненты линейной поляризации СИ электрона со спином, направленным против магнитного поля, совпадает (с точностью до масштабного множителя) с угловым распределением π компоненты СИ электрона, спин которого сонаправлен с внешним полем. Иначе говоря, угловые распределения мощности СИ электрона со спином против поля ($\zeta = -1$) и по полю ($\zeta = 1$) "меняются местами". И, хотя в [11] уже было показано, что наличие π -компоненты излучения в плоскости орбиты обусловлено переходами с переворотом спина, возможность "смены местами" в зависимости от ориентации спина в этой работе не была отражена. Нами также найден коэффициент отношения вероятностей переходов с переворотом и без переворота спина и показано, что в ультрарелятивистском приближении эти переходы становятся равновероятными.

Небольшой раздел второй главы посвящен особенностям излучения неполяризованного электрона, для которого были определены аналоги характеристик угловых распределений $\bar{q}_i^e(\beta)$, $\bar{p}_i^e(\beta, \theta)$, $\bar{q}_i^e(\beta, \theta)$.

Далее, с целью выявить роль спиновых свойств и их вклад в излучение, проводился сравнительный анализ характеристик излучения бозона и электрона. Было показано, что для поляризованного электрона существует некая энергия ($\beta = 0.98950989$), при которой испускается максимальное количество излучения (для бозона и неполяризованного электрона максимум достигается лишь при $\beta \rightarrow 1$). Нами были введены функции, равные отношению мощности излучения электрона (поляризованного и неполяризованного) к мощности излучения бозона. Оказалось, что электрон со спином, направленным против внешнего поля, при любых энергиях излучает почти в 4 раза больше, чем бозон. Неполяризованный электрон в релятивистской области

излучает в ~ 2 раза больше бесспиновой частицы, а в релятивистской области - также, как и при $\zeta = -1$, - почти в 3 - 4 раза больше бозона. Если же спин электрона в начальном состоянии сонаправлен с внешним полем, то он излучает больше бозона лишь в релятивистской области. Итак, излучаемая электроном мощность существенно зависит от ориентации спина в слаборелятивистской области, но с ростом энергии частицы эта зависимость исчезает.

Затем во второй главе сравниваются основные характеристики классического и квантового излучения. Во-первых, нам удалось выяснить, что, вопреки предсказаниям классической теории, вклад излучения типа поляризации 2 (т.е. σ -компонента) уменьшается и для бозона, и для электрона (поляризованного и неполяризованного) с ростом β . Во-вторых, для электрона (поляризованного и неполяризованного) степень правой круговой поляризации растет при увеличении энергии, причем в ультрарелятивистском пределе излучение электрона полностью поляризовано по кругу: в верхней полуплоскости излучается только правая поляризация (количество лево-поляризованного излучения исчезающе мало), а в нижней - только левая. Поляризационные свойства излучения бозона в классической теории лучше отражаются основной гармоникой спектра.

Как и для полного спектра в классике, вклады $p_i^e(-1, \beta, \theta)$ не имеют однозначного предела при $\beta \rightarrow 1$, $\theta \rightarrow \pi/2$. Однако электронные функции $p_i^e(\beta \rightarrow 1, \pi/2)$ имеют конечные значения. Нами отдельно изучено поведение вкладов $p_i^b(\beta, \theta)$, $p_i^e(\zeta, \beta, \theta)$, $\bar{p}_i^e(\beta, \theta)$ для каждого из типов поляризации и установлено, что, не смотря на наличие спиновых свойств, структура угловых распределений электрона в целом лучше согласуется с результатами классической теории, нежели угловые распределения излучения бесспиновой частицы. Функции p_i^e ($i = 0, 1, 3$) и \bar{p}_3^e начиная с некоторого β (разного для каждого типа поляризации), теряют монотонность. Соответствующие значения β нами найдены, а также изучена структура $\theta_i^{(max)}(\beta)$ - углов, при которых достигается максимум функций $p_i^e(\beta, \theta)$.

Наилучшим образом с классической теорией согласуется поведение функций $q_i^{b,e}(\beta, \theta)$, характеризующих степень поляризации излучения бозона и электрона, распространяющегося в определенном направлении θ . Как и предсказывала классическая теория, в направлении магнитного поля испускается полностью право-поляризованное излучение, а левая круговая поляризация отсутствует. В плоскости орбиты излучение полностью линейно поляризовано (как было сказано выше, этот вывод не относится к неполяризованному электрону).

Исследование эффективных углов излучения бозона и электрона также позволило открыть новые интересные особенности и опровергнуть некоторые известные в классической теории результаты. Понятие эффективного угла было введено в [7, 12], там же определялся и угол отклонения. Определение

последнего в работе изменено: вместо полусуммы $\alpha_i = (\theta_i^{(1)} + \theta_i^{(2)})/2$, углом отклонения мы назвали сам угол $\theta_i^{(2)}$, задающий правый конец интервала, в который испускается половина всей излучаемой мощности (в верхней полуплоскости для $i = 0, 2, 3$ и полной мощности для $i = 1$). Как известно, согласно классической теории, эффективные углы в ультрарелятивистском случае достигают нулевого значения, то есть происходит концентрация излучения в плоскости орбиты движения частицы. Функции $\Delta_i^b(\beta)$, $\Delta_i^e(\beta)$, $\bar{\Delta}_i^b(\beta)$, характеризующие эффективные углы излучения типа поляризации i бозона, электрона и неполяризованного электрона соответственно, при $\beta \rightarrow 1$ стремятся к некоторым отличным от нуля значениям (рисунок 1). Таким образом, квантовая теория не подтверждает выводов о концентрации излучения.

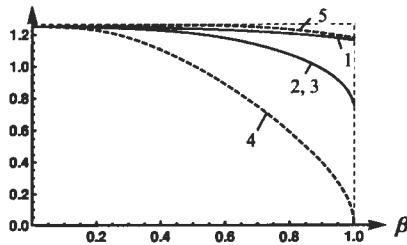


Рис. 1. Графики эффективных углов полного излучения бозона (1), электрона (2), неполяризованного электрона (3), полного классического спектра (4) и его первой гармоники (5).

Результаты второй главы опубликованы в работе [4].

В третьей главе решается задача о свойствах простейшего квантового спектра излучения бесспиновой частицы. Нами рассмотрена трехуровневая система (реальная, а не модельная): начальное состояние охарактеризовано главным квантовым числом $n = 2$ и существуют 2 возможных квантовых перехода: $n = 2 \rightarrow s = 1 (\nu = 1)$, $n = 2 \rightarrow s = 0 (\nu = 0)$, где s - номер конечного состояния, а ν - гармоника излучения.

Нами были изучены поляризационные свойства полного спектра и его отдельных гармоник, а именно: рассмотрены отношения количества полного излучения (на конкретной гармонике) типа поляризации i к полному ($i = 0$) излучению спектра (этой же гармоники). Оказалось, что в случае отдельных гармоник, классическая теория является вполне репрезентативной: характер указанных отношений с ростом β меняется в согласии с ее предсказаниями. Полный, то есть двухчастотный, квантовый спектр согласуется с полученными в классике результатами для 2-части спектра (подробно изученными

в первой главе). Однако, бесконечный классический спектр для выбранного отношения предсказывает совершенно противоположные тенденции, причем это касается всех компонент поляризации. Понятие частичного вклада, введенное в первой главе в рамках классической теории, может быть распространено и на квантовый двухчастотный спектр, что нами и было проделано. Для частичных вкладов наблюдалось качественное согласие между классической квантовой теориями: в квантовой теории с ростом энергии частичный вклад первой гармоники уменьшается, а частичный вклад второй - увеличивается и, начиная с некоторого β , вторая гармоника становится доминирующей. Это означает, что с ростом энергии максимум в спектре переходит на вторую гармонику, что также соответствует выводам классической теории. Существенное отличие заключается в том, что в пределе $\beta \rightarrow 1$ частичные вклады стремятся к конечным значениям, а не обращаются в ноль, как это происходит в классике. Как показано на рисунке 2, классическая теория для 2-части спектра хорошо согласуется с квантовой.

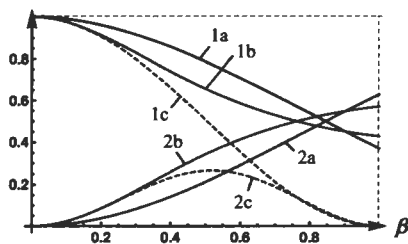


Рис. 2. Вклады гармоник (первой - (1), второй - (2)) в полное излучение. Пунктирная линия соответствует классической теории (вклад в 2-часть спектра - (b), в полный спектр - (c)).

Похожие выводы были получены и в отношении спектрально-угловых распределений - качественно их характер для случая $n = 2$ в квантовой теории имеет сходство с классическими угловыми распределениями, с тем исключением, что для классических угловых распределений при $\beta \rightarrow 1$ конечного предела не существует. Можно также утверждать, что классические характеристики спектрально-угловых распределений 2-части спектра имеют в целом большее (как количественное, так и качественное) сходство с результатами квантовой теории, чем характеристики, рассчитанные для полного классического спектра. Изучение поведения эффективных углов методами квантовой теории, как и в случае переходов из $n = 1$, показало, что концентрация излучения в плоскости орбиты не происходит, и эффективные углы

для каждого типа поляризации, для полного квантового спектра и отдельных его гармоник стремятся к конечным ненулевым значениям. Итак, основными результатами предпоследней главы можно считать следующие: во-первых, оказалось, что, обрывая бесконечный спектр на "нужной" гармонике, можно сделать классическую теорию более репрезентативной по отношению к квантовой, и, во-вторых, нами, теперь уже для двухчастотного квантового спектра, опровергнут вывод о концентрации излучения в плоскости орбиты в ультрарелятивистском пределе.

В последней четвертой главе с точки зрения квантовой теории рассматривается эволюция спектрального максимума излучения бозона. Впервые в рамках классической теории СИ этот вопрос поднимался еще Л.А. Арцимовичем и И.Я. Померанчуком [6]. Ими было показано, что частота, вблизи которой лежит максимум излучения, может принимать различные значения (в том числе попасть в видимую часть спектра) и, наряду с этим выводом, получен результат: $\nu_{max} \sim \gamma^3$ в ультрарелятивистском пределе (ν_{max} - частота, на которую приходится максимум излучения). То есть, при $\beta \rightarrow 1$ максимум в классическом спектре уходит на все более высокие гармоники как γ^3 (неограниченный рост ν_{max}). В предыдущей главе на примере короткого квантового спектра был изучен переход максимума с первой гармоники на вторую (при $\beta = 0.84618105$). В нерелятивистском пределе квантовая теория, находясь в полном согласии с классической, предсказывает излучение лишь первой гармоники. То есть для двухчастотного квантового спектра имеем: в нерелятивистской области максимум излучения приходился на первую гармонику, но с увеличением энергии сместился на вторую. Остается предположить, что при произвольном $n > 2$ максимум в квантовом спектре будет постепенно с ростом энергии смещаться в сторону $\nu = n$. Существенное отличие от классической теории заключается в том, что квантовый спектр ограничен: $\nu \leq n$. Тем не менее, максимум перемещается последовательно, а это означает, что существует такая энергия, при которой он переходит с гармоники $\nu = n - 1$ на гармонику $\nu = n$. Глава 4 содержит решение задачи о нахождении условий, при которых такое смещение происходит. Выбранный способ решения предполагает поиск параметров, при которых количество излучения при переходе в первое возбужденное состояние совпадает с количеством излучения при переходе в основное. Таким образом фиксируется момент сдвига максимума с предпоследней гармоники на последнюю. Аналогично можно проследить за переходом максимума с $\nu = n - 2$ на $\nu = n - 1$, что нами и было проделано с целью получить подтверждение (хотя бы численное) следующим выводам. Как показали расчеты, при больших n справедлива асимптотическая формула $\gamma_n^2 = 2k_0n$, где γ_n - значение релятивистского фактора, при котором максимум переходит с гармоники $\nu = n - 1$ на $\nu = n$, а k_0 - постоянный множитель, $k_0 = 1.146128793$. Подобная формула найдена и для переходов

максимума с $\nu = n - 2$ на $\nu = n - 1$: $\gamma_n^2 = 2k_1 n$ (по точкам (n, γ_n^2) построены аппроксимации, рисунок 3).

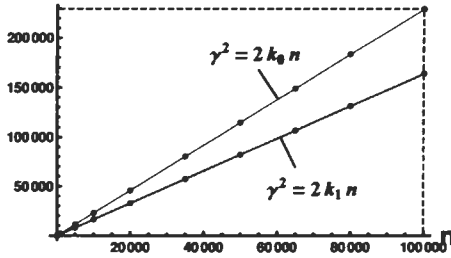


Рис. 3. Точки (n, γ_n^2) и построенные по ним аппроксимации.

Поскольку для бозона известна связь γ^2 с внешним полем b , следующая из уравнения Клейна-Гордона, $\gamma_n^2 = 1 + (2n + 1)b$, то, очевидно, при $n \gg 1$, $k_0 = b_0$ (b_0 - конкретная величина поля), и, соответственно, $k_1 = b_1 < b_0$. Отмечено, что величины b_0 и b_1 не зависят от n , и справедливо следующее заключение: если величина магнитного поля такова, что $b < b_0$, то, в каком бы начальном состоянии не находилась частица, спектральный максимум СИ приходится на наибольшую возможную (последнюю) гармонику $\nu_{max} = n$. При полях $b_1 \leq b < b_0$ максимум лежит на гармонике $\nu = n - 1$, и на $\nu \leq n - 2$ при $b < b_1$. Проведенный в последней главе анализ, а также численные расчеты позволили выдвинуть предположение о существовании ряда чисел $b_0 > b_1 > \dots > b_s$, такого, что если $b < b_s$, то в каком бы начальном состоянии $n > s$ не находилась частица, спектральный максимум СИ приходится на гармонику $\nu_{max} \leq n - s$, причем с ростом n спектральный максимум СИ смещается на более высокие гармоники (при сохранении неравенства $\nu_{max} \geq n - s$). Если $b_m < b < b_{m-1}$ ($1 \leq m \leq s$), то в каком бы начальном состоянии $n > m$ не находилась частица, спектральный максимум СИ приходится на гармонику $\nu_{max} = n - m$. Если $b \geq b_0$, то при любом n имеем $\nu_{max} = n$.

В Заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

В Приложении содержатся таблицы значений эффективных углов и углов отклонения, рассчитанных в рамках квантовой теории излучения для переходов из первого и второго возбужденных состояний.

Основные результаты работы

1. В классической теории СИ введено понятие n -части спектра. Для выделенной части бесконечного спектра исследована структура угловых

профилей излучения. При этом выяснилось, что большинство результатов, полученных для укороченного классического спектра, согласуются с квантовой теорией лучше, чем известные классические характеристики полного спектра.

2. Было установлено, что компоненты линейной поляризации поперечно поляризованного электрона "меняются местами" в зависимости от ориентации спина и, следовательно, получено точное аналитическое доказательство наличия ненулевого излучения типа поляризации Σ в плоскости орбиты движения неполяризованного электрона.
3. Методами квантовой теории показано, что для спинорных частиц при переходах из первого возбужденного состояния в ультрарелятивистском пределе наблюдается вытеснение компонент круговой поляризации друг другом в верхнюю и нижнюю полуплоскости.
4. Для слабовозбужденных частиц опровергнут известный в классической теории вывод о концентрации полного (суммированного по спектру) излучения в плоскости орбиты в ультрарелятивистском пределе. Показано, что эффективные углы излучения как бесспиновой, так и спинорной частицы стремятся в этом пределе к конечным ненулевым значениям. Это заключение следует считать справедливым как для полного квантового излучения, так и в отношении отдельных компонент линейной или круговой поляризации.
5. Изучены свойства двухчастотного квантового спектра бозона и проведено качественное и количественное сравнение классических и квантовых характеристик. На основе численных расчетов сделано предположение о репрезентативности классической теории, восстановленной для выделенной части спектра.
6. Найдено условие смещения максимума в квантовом спектре излучения бесспиновой частицы на последнюю гармонику. Чтобы произошло такое смещение, внешнее поле должно достигнуть некоторого критического значения (или превысить его). Показано, что данное условие является необходимым: если напряженность магнитного поля ниже критической, ни при каких значениях других параметров излучения максимум на последнюю гармонику не переходит.

Список публикаций

1. Буримова А. Н. Сравнительный анализ угловых распределений мощности синхротронного излучения, рассчитанных методами классической теории и квантовой теории для слабозбужденных частиц // Известия ВУЗов. Физика. 2012. Т. 55, № 10. С. 31–36.
2. Bagrov V. G., Burimova A. N. // Proceedings of PAC 2011. New York: PAC'11 OC / IEEE, 2011. P. 1810–1812.
3. Bagrov V. G., Burimova A. N. Study of the Influence of Spin on the Angular Distribution of Synchrotron Radiation for Weakly Excited Particles // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. Vol. 295. P. 012109(1–5).
4. Bagrov V. G., Burimova A. N., Gitman D. M., Levin A. D. Quantum deformation of the angular distributions of synchrotron radiation. Emission from particles in the first excited state // The European Physical Journal C - Particles and Fields. 2012. Vol. 72, no. 2. P. 1871(1–12).
5. Bagrov V. G., Burimova A. N., Gusev A. A. // Particle Physics on the EVE of LHC. Proceedings of the Thirteenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics / Ed. by A. I. Studenikin. Singapore: World Scientific, 2009. P. 411–415.

Цитированная литература

6. Арцимович Л. А., Померанчук И. Я. Излучение быстрых электронов в магнитном поле // ЖЭТФ. 1946. Т. 16, № 5. С. 379–389.
7. Багров В. Г., Гитман Д. М., Тлячев В. Б., Яровой А. Т. Эволюция угловых распределений компонент поляризации синхротронного излучения при изменении энергии заряда // Труды XV Международной летней школы - семинара "Волга" по современным проблемам теоретической и математической физики. Петровские чтения (Казань, 2003 г.) / Ed. by А. В. Аминова. Казань: Хэтер, 2004. P. 9–25.
8. Багров В. Г., Дорофеев О. Ф. Излучение поляризованных электронов, находящихся на низких энергетических уровнях в магнитном поле // Вестник Московского Университета. Физика, астрономия. 1966. Т. 7, № 2. С. 97–101.
9. Багров В. Г., Дорофеев О. Ф., Тернов И. М. Особенности поведения электронов, движущихся в магнитном поле на низких уровнях // Известия ВУЗов. 1968. Т. 11, № 10. С. 63–69.

10. Должин М. В., Багров В. Г., Серавкин К. Г., Шахматов В. М. Парциальные вклады отдельных гармоник в мощность синхротронного излучения // Известия ВУЗов. Физика. 2006. Т. 49, № 7. С. 3–10.
11. Bagrov V. G., Dolzhin M. V. Dependence of Spectral-Angular Distribution of Synchrotron Radiation from Spin Orientation // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. A. 2007. Vol. 575, no. 1-2. P. 231–233.
12. Bagrov V. G., Gitman D. M., Tlyachev V. B., Jarovoi A. T. New theoretical results in synchrotron radiation // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. B. 2005. Vol. 240, no. 3. P. 638–645.

102

**Тираж 110 экз. Заказ 1219.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.**