

На правах рукописи



Бабаев Антон Анатольевич

СПИНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ  
ПЛОСКОСТНОМ КАНАЛИРОВАНИИ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПОЗИТРОНОВ И  
ТЯЖЕЛЫХ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре теоретической и экспериментальной физики Томского политехнического университета и в НИИ Ядерной Физики Томского политехнического университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор  
Пивоваров Юрий Леонидович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор  
Бордовицын Владимир Александрович

доктор физико-математических наук, профессор  
Крючков Юрий Юрьевич

Ведущая организация:

Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «11» февраля 2010 г. в 16.30 на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 при Томском государственном университете по адресу: Томск, пр-т Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ивонин И. В.

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## 1.1 Актуальность темы

Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами является активно развивающейся областью современной науки, в связи с постоянным расширением возможностей ускорительной техники и диапазона доступных для экспериментов энергий частиц. Среди множества различных исследуемых эффектов значительный интерес представляет каналирование частиц — особый режим движения частиц в кристалле, при котором, вследствие взаимодействия с электрическим полем кристалла, отрицательно заряженная частица движется вблизи кристаллографических осей или плоскостей кристалла, а положительно заряженная частица движется между осями или плоскостями, не пересекая их. Если движение частицы связано с плоскостями, каналирование называется плоскостным, если с осями — аксиальным. Основные процессы, протекающие при каналировании, рассмотрены в монографиях [1-4].

Несмотря на активную теоретическую и экспериментальную разработку, вопросы, связанные с наличием у каналированной частицы спина, зачастую остаются вне поля зрения исследователей. Как правило, *a-priori* считается, что эти эффекты малы.

При плоскостном или аксиальном каналировании электронов и позитронов их поперечное по отношению, соответственно, к плоскостям или осям движение характеризуется возникновением дискретного спектра разрешенных энергетических состояний. По аналогии с тонким расщеплением уровней энергии электронной системы атома вследствие спин-орбитального взаимодействия, взаимодействие спина частицы с электрическим полем кристалла, казалось бы, должно приводить к расщеплению уровней энергии разрешенных состояний поперечного движения. Это предположение подтверждено для случая аксиального каналирования [5]. Плоскостной случай до сих пор не рассматривался.

Каналированный ион движется в периодическом в пространстве электрическом поле кристалла. В его системе покоя возникают периодические во времени электрическое и магнитное поля. Если частота этих полей совпадает с частотой перехода между основным и каким-

либо другим уровнями энергии электронной оболочки иона, возможен резонансный переход иона в соответствующее возбужденное состояние – резонансное когерентное возбуждение (resonant coherent excitation, RCE). В плоскостном случае RCE наблюдается, когда для некоторых векторов обратной решетки  $k_y$  и  $k_z$  в плоскости каналирования (плоскость, вдоль которой происходит каналирование) выполняется условие:

$$\Delta E = \hbar \gamma \nu (k_y \cos \varphi + k_z \sin \varphi) \quad (1)$$

где  $\Delta E$  – энергия перехода между уровнями энергии,  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $\nu$  – продольная скорость иона (проекция скорости на плоскость каналирования),  $\varphi$  – угол между скоростью иона  $\nu$  и кристаллографической осью в плоскости, вектор обратной решетки которой  $k_y$ . Из (1) следует, что связаны: с одной стороны, энергия возбуждения (зависит от заряда ядра иона  $Z$ ), с другой – импульс иона ( $\gamma\nu$ ). Фактически, именно энергия пучка определяет ионы, подходящие для RCE экспериментов. До 1998 г. исследования RCE в силу (1) проводились с нерелятивистскими водородоподобными ионами (H-ионами). RCE нерелятивистских ионов хорошо исследовано экспериментально и теоретически (см. обзор [6]).

В связи с вводом в эксплуатацию новых ускорителей (FAIR, GSI, Дармштадт, Германия; RIKEN, Токио), способных разгонять ионы до энергий порядка нескольких десятков ГэВ/а.е.м., становятся доступны эксперименты по RCE тяжелых релятивистских ионов ( $Z=18$  и выше). Тяжелые H-ионы характеризуются, в частности, значительной энергией взаимодействия магнитного момента орбитального электрона с ядром (спин-орбитального взаимодействия). Спин-орбитальное взаимодействие, как известно, приводит к тонкой структуре уровней энергии орбитального электрона. Первые эксперименты, проведенные с релятивистскими H-ионами  $\text{Ar}^{17+}$  (HIMAC, Chiba, Япония) продемонстрировали значительное влияние тонкой структуры уровней энергии орбитального электрона на характеристики RCE [7-10]. Теоретических работ, в которых были бы предложены модели RCE релятивистских H-ионов, учитывающие спин-орбитальное взаимодействие, на момент написания диссертации не опубликовано.

Исследование RCE представляет и практический интерес в связи с открывающимися возможностями для спектроскопии тяжелых H-ионов, а также для получения возбужденных ионов.

## 1.2 Цели работы

В связи с изложенным выше, формулируются цели работы:

1. Получить решения уравнения Дирака для релятивистских электронов и позитронов, движущихся практически ортогонально одномерному электрическому полю (подобным образом движутся частицы при плоскостном каналировании), с учетом определенной поляризации спина частицы. Получить также решения уравнения Клейна-Гордона для бесспиновой частицы, движущейся в аналогичных условиях.
2. Получить численные оценки влияния спина релятивистских электронов и позитронов на спектр разрешенных состояний поперечного движения, возникающий при плоскостном каналировании этих частиц.
3. Развить теорию RCE тяжелых релятивистских водородоподобных ионов, движущихся в кристалле в условиях плоскостного каналирования с учетом тонкой структуры уровней энергии орбитального электрона и эффекта Штарка, возникающего благодаря действию на электрон H-иона электрического поля кристалла.
4. Использовать разработанную теорию RCE для описания экспериментов [7-10] и прогнозирования результатов дальнейших перспективных экспериментов на строящемся ускорительном комплексе FAIR (Дармштадт, Германия) в рамках коллаборации GSI-RIKEN-TPU.

## 1.3 Научная новизна результатов

1. Впервые показано, что уровни энергии разрешенных состояний поперечного движения электрона и позитрона при плоскостном каналировании расщепляются, либо сдвигаются в зависимости от ориентации спина частицы.
2. Впервые получены численные оценки расщепления и сдвига уровней энергии разрешенных состояний поперечного движения электрона и позитрона при плоскостном каналировании.
3. Впервые разработана теоретическая модель RCE тяжелых релятивистских H-ионов, учитывающая спин-орбитальное взаимодействие орбитального электрона с ядром, эффект Штарка, возникающий вследствие действия электрического поля кристалла на электрон иона, Лэмбовский сдвиг уровней энергии и ионизацию H-иона электронами кристалла.

4. Впервые, с помощью разработанной компьютерной программы, выполнено моделирование RCE тяжелых релятивистских H-ионов и продемонстрировано возникновение обусловленного влиянием спин-орбитального взаимодействия четко выраженного дублета в зависимости вероятности RCE от угла  $\varphi$ .
5. Впервые указано на возможно заметное влияние магнитного поля, существующего в системе покоя, иона на характеристики RCE тяжелых релятивистских H-ионов.

#### 1.4 Научно-практическая значимость работы

На основе решения релятивистских уравнений движения показаны границы применимости обычно используемого в физике взаимодействия частиц с кристаллами предположения о том, что спином каналированных электронов и позитронов можно пренебречь.

Разработанная теория RCE тяжелых релятивистских водородоподобных ионов и созданный на ее основе компьютерный код могут быть использованы при подготовке экспериментов с такими ионами, например, на строящемся ускорительном комплексе GSI FAIR (Дармштадт, Германия) в рамках коллаборации GSI-RIKEN-TPU.

#### 1.5 Положения, выносимые на защиту

1. Метод решения уравнений Дирака для релятивистских электрона и позитрона при плоскостном каналировании, учитывающий наличие у частицы спина. Применение спиновых операторов при рассмотрении плоскостного каналирования электронов и позитронов.
2. Расщепление уровней энергии разрешенных состояний поперечного движения позитронов и электронов при плоскостном каналировании, если спин частицы поляризован по направлению продольного импульса (проекция полного импульса на плоскость каналирования), и сдвиг уровней энергии, если спин частицы поляризован ортогонально продольному импульсу и электрическому полю кристаллографических плоскостей.
3. Теория RCE тяжелых релятивистских водородоподобных ионов. Алгоритм решения уравнения Шредингера для орбитального электрона тяжелого релятивистского водородоподобного иона, движущегося в кристалле при плоскостном каналировании в условиях возникновения RCE.

4. Влияние спин-орбитального взаимодействия электрона иона с ядром на RCE тяжелых релятивистских H-ионов при плоскостном каналировании. Дублетная структура пиков RCE в соответствии с тонкой структурой первого возбужденного уровня H-иона.

## **1.6 Достоверность научных результатов и выводов**

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается внутренней согласованностью и логической завершенностью применяемых теорий и моделей, а также хорошим соответствием с экспериментальными данными там, где они существуют. При проведении численных расчетов (C++) использовались стандартные методы и алгоритмы.

## **1.7 Личный вклад соискателя**

Соискатель принимал активное участие в теоретической разработке способов решения поставленных задач, анализе результатов и подготовке статей к печати. Собственным вкладом автора является разработка необходимого компьютерного кода. Все основные результаты диссертации получены автором лично.

## **1.8 Апробация работы**

Результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедры теоретической и экспериментальной физики Томского политехнического университета, докладывались на следующих конференциях:

1. XXXVI, XXXVII и XXXVIII Международные конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, май 2006, 2007 и 2008 гг.
2. “International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena: Channeling-2006”, Frascati, Italy, 3-7 июля 2006 г.
3. “XXV International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions: XXV ICPEAC”, Freiburg, Germany, 25-31 июля 2007 г.
4. “Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: RREPS-07”, Prague, Czech Republic, 24-28 сентября 2007 г.
5. “51-st Workshop: Channeling-2008; Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena”, Erice, Italy, 25 октября – 1 ноября 2008 г.
6. “19-th Ion Beam Analysis Conference”, Cambridge, UK, 7-11 сентября 2009 г.

## 1.9 Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 8 работах, список которых приведен в конце автореферата. Из них 6 статей в реферируемых журналах, 1 препринт LNF INFN (Национальные Лаборатории Фраскати, Италия) и публикация в трудах международной конференции “Channeling-2006”.

## 1.10 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 130 страниц, включая список использованной литературы и приложения. Диссертация содержит 33 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 107 наименований.

## 2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, приведены структура и содержание диссертации, кратко перечислены основные результаты.

В **главе 1** рассмотрены уравнения Дирака и Клейна-Гордона для релятивистских электронов и позитронов, движущихся практически перпендикулярно одномерному электрическому полю.

В § 1.1 записано и приведено к удобному для работы виду уравнение Дирака для электрона и позитрона.

В § 1.2 записаны спиновые операторы, определены спиновые интегралы движения применительно к данной задаче. Выяснено, что при указанном выше движении электрона или позитрона можно говорить о сохранении проекции спина частицы на направление ее продольного импульса (проекции полного импульса на плоскость, вдоль которой осуществляется каналирование), либо на направление, перпендикулярное продольному импульсу и электрическому полю.

В § 1.3 определены собственные значения спиновых операторов отдельно для случаев продольной (когда спин частицы поляризован в направлении продольного импульса) и поперечной поляризации спина частицы (когда спин частицы ортогонален продольному импульсу и электрическому полю). Для случая продольной поляризации сделан вывод о различных значениях энергии разрешенных состояний поперечного движения электрона и позитрона для проекций спина по-

против продольного импульса частицы. Для случая поперечной поляризации сделан вывод о независимости энергетического спектра разрешенных состояний поперечного движения от знака проекции спина частицы.

В § 1.4 рассмотрено уравнение Клейна-Гордона для тех же условий, что и уравнение Дирака. Показано, что для случая продольной поляризации спектр энергий разрешенных состояний поперечного движения частицы, спин которой ориентирован противоположно продольному импульсу, совпадает со спектром, полученным без учета спина частицы. А уровни энергии частицы, спин которой ориентирован по направлению продольного импульса, сдвинуты относительно уровней энергии бесспиновой частицы. То есть, можно говорить о расщеплении уровней энергии в зависимости от проекции спина частицы на направление продольного импульса. Для случая поперечной поляризации получено, что уровни энергии частицы, определенные с учетом ее спина, сдвинуты относительно уровней энергии бесспиновой частицы.

В главе 2 рассмотрено плоскостное каналирование поляризованных электронов и позитронов. Получены численные оценки расщепления уровней энергии разрешенных состояний поперечного движения (в случае продольной поляризации) и сдвига (в случае поперечной поляризации) для электронов и позитронов.

В § 2.1 получено аналитическое решение уравнений Дирака и Клейна-Гордона для случая плоскостного каналирования позитронов, когда непрерывный плоскостной потенциал аппроксимируется параболическим потенциалом.

В § 2.2 даны численные оценки возникающих эффектов расщепления и сдвига при плоскостном каналировании позитронов. Показано, что для очень широкого интервала энергий позитронов эти эффекты исчезающе малы по сравнению с расстоянием между соседними уровнями энергии разрешенных состояний поперечного движения (табл. 1).

В § 2.3 даны численные оценки возникающих эффектов расщепления и сдвига при плоскостном каналировании электронов. Непрерывный плоскостной потенциал аппроксимируется модифицированным потенциалом Пешля-Теллера (табл. 2).

В главе 3 представлена теоретическая модель RCE тяжелых релятивистских Н-ионов, движущихся в кристалле в условиях плоскост-

ного каналирования. Рассмотрено RCE, возникающее, когда в системе покоя иона частота периодического во времени электрического поля совпадает с частотой перехода из основного в первое возбужденное состояние.

| $E_{  }$ , МэВ | $\varepsilon_0$ , эВ | $\delta^{  } / \Delta$ | $\delta^{\perp} / \Delta$ |
|----------------|----------------------|------------------------|---------------------------|
| 0.6            | 8.1                  | 3.3E-6                 | 1.1E-6                    |
| 5              | 2.8                  | 1.4E-7                 | 3.7E-10                   |
| 50             | 0.9                  | 4.4E-9                 | 1.2E-13                   |
| 500            | 0.3                  | 1.4E-10                | 3.7E-17                   |

Табл.1. Отношение величин расщепления  $\delta^{||}$  (при продольной поляризации спина) и сдвига  $\delta^{\perp}$  (при поперечной поляризации спина) основного уровня энергии  $\varepsilon_0$  к интервалу между основным и первым уровнями энергии  $\Delta$  при различной кинетической энергии позитрона  $E_{||}$ .

| $E_{  }$ , МэВ | $\varepsilon_0$ , эВ | $\delta^{  } / \Delta$ | $\delta^{\perp} / \Delta$ |
|----------------|----------------------|------------------------|---------------------------|
| 5              | -13.2                | 3.1E-7                 | -                         |
| 50             | -17.5                | 1.2E-8                 | -3.4E-13                  |
| 500            | -19.2                | 4.0E-10                | -1.2E-16                  |

Табл.2. Отношение величин расщепления  $\delta^{||}$  (при продольной поляризации спина) и сдвига  $\delta^{\perp}$  (при поперечной поляризации спина) основного уровня энергии  $\varepsilon_0$  к интервалу между основным и первым уровнями энергии  $\Delta$  при различной кинетической энергии электрона  $E_{||}$ .

В § 3.1 вводятся система координат и плоскостной потенциал.

В § 3.2 описывается движение релятивистского водородоподобного иона при плоскостном каналировании, вводится сопутствующая система координат (accompanying frame, AF), в которой в дальнейшем рассматривается внутренняя динамика иона. Движение иона в AF – нерелятивистские колебания в поперечном к плоскостям направлении.

В § 3.3 решается стационарное уравнение Шредингера, определяющее систему уровней энергии орбитального электрона каналированного H-иона с учетом спин-орбитального взаимодействия, эффекта Штарка (который приводит к зависимости положения уровней энергии орбитального электрона от положения иона в канале) и Лэмбовского сдвига уровней энергии.

В § 3.4 решается временное уравнение Шредингера в AF для орбитального электрона иона, находящегося в периодическом во времени электрическом поле (магнитное поле считается пренебрежимо малым). Реальная искривленная траектория иона заменяется последо-

вательностью коротких прямолинейных отрезков, для каждого из которых определяются энергии и волновые функции стационарных состояний в соответствии со схемой, изложенной в § 3.3. Временное уравнение Шредингера решается для каждого короткого отрезка, затем решения на отдельных отрезках сшиваются. При решении используется резонансное приближение [11], учитывается ионизация иона при столкновениях с электронами кристалла. После определения волновой функции орбитального электрона в момент вылета иона из кристалла, определяются вероятности нахождения орбитального электрона в основном либо первом возбужденном состояниях, а также вероятность ионизации иона. Затем проводится усреднение этих вероятностей по всем возможным траекториям в канале кристалла и определяются фракции (доли ионов в определенных состояниях) в выходящем из кристалла пучке: фракция ионов в возбужденном состоянии, фракция ионов в основном состоянии, фракция ионов, сохранивших свое зарядовое состояние, ионизованная фракция. Поскольку энергия связи орбитального электрона в возбужденном состоянии меньше, чем в основном, ион в возбужденном состоянии ионизируется вследствие соударений с электронами кристалла с большей вероятностью, чем ион в основном состоянии. Очевидно, количество ионов, сохранивших свое зарядовое состояние (не ионизованных) должно уменьшаться, когда выполняются условия RCE. Это обстоятельство, а также наличие тонкой структуры уровней энергии, определяют зависимость фракции ионов, сохранивших зарядовое состояние, от углов между продольной скоростью иона и кристаллографическими осями (см. (1)). Развитая теория применима для описания RCE релятивистских водородоподобных ионов с энергиями до нескольких ГэВ/а.е.м., пока магнитным полем в АФ можно пренебречь.

В § 3.5 обсуждаются особенности RCE релятивистских водородоподобных ионов с очень большим зарядом ядра ( $Z \gg 10$ ). Наблюдение RCE таких ионов требует очень больших энергий пучка (до 10 ГэВ/а.е.м. и более). Показано, что на RCE помимо электрического поля в АФ может оказывать заметное влияние и магнитное поле.

В главе 4 представлены результаты вычислений различных характеристик RCE тяжелых релятивистских водородоподобных ионов.

В § 4.1 представлена апробация развитой в главе 3 модели на примере 390 МэВ/а.е.м. ионов  $\text{Ar}^{17+}$  при (220) плоскостном каналиро-

вании в кристалле Si (условия экспериментов [7-10]). Условие RCE (1) в данном случае приобретает вид:

$$\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_0}{2\pi\hbar\gamma v} \approx n_y \frac{\sqrt{2} \cos \varphi}{a} + n_z \frac{\sin \varphi}{a},$$

где  $n_y$  и  $n_z = 0, 1, \dots$ ,  $\varepsilon_j - \varepsilon_0$  – энергия перехода с основного на один из подуровней первого возбужденного состояния (их 4, рис.1),  $\varphi$  – угол между продольной скоростью иона и  $\langle 110 \rangle$  осью,  $a$  – постоянная решетки. Определена зависимость энергий перехода орбитального электрона с основного уровня на подуровни первого возбужденного уровня энергии от положения иона в канале (Рис.1). Прослежено изменение вероятности RCE вдоль траектории иона. Исследованы фракции ионов в выходящем из кристалла пучке при RCE на различных гармониках периодического потенциала (т.е., для различных пар чисел  $n_y$  и  $n_z$ , рис.2). Наглядно продемонстрировано, что резонансные кривые (зависимости фракций ионов в выходящем пучке от угла  $\varphi$ ) имеют два пика (или два минимума), соответствующих компонентам тонкой структуры первого возбужденного состояния с полным моментом  $j=1/2$  и  $j=3/2$ . Ширина пиков определяется траекторно-зависимым эффектом Штарка (рис.1). Достигнуто достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными [7-10].

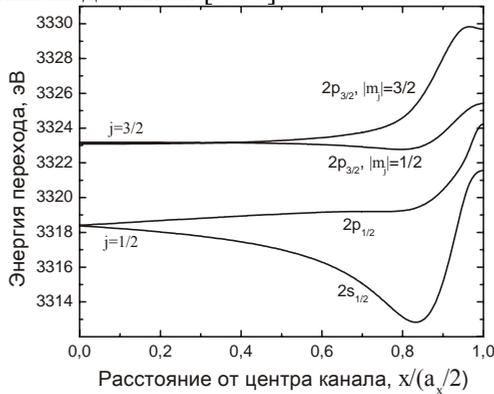


Рис.1. Зависимость энергий перехода с основного уровня энергии на подуровни первого возбужденного состояния как функции расстояния  $x$  от центра канала при (220) каналировании 390 МэВ/а.е.м. ионов  $\text{Ar}^{17+}$  в кристалле Si;  $a_x$  – межплоскостное расстояние,  $m_j$  – квантовое число проекции полного момента  $j$  на направление электрического поля непрерывного плоскостного потенциала.

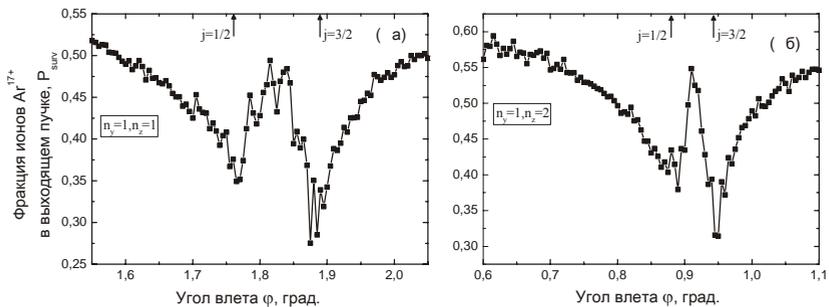


Рис.2. Фракция ионов, сохранивших зарядовое состояние,  $P_{surv}$  в выходящем из кристалла пучке при (220) каналировании 390 МэВ/а.е.м ионов  $Ag^{17+}$  в кристалле Si как функция угла  $\varphi$  между продольной скоростью иона и  $\langle 110 \rangle$  осью. Толщина кристалла 21 мкм. Условие RCE выполняется для а)  $(n_y, n_z)=(1, 1)$  и б)  $(n_y, n_z)=(1, 2)$  гармоник периодического потенциала.

В § 4.2 на примере (220) плоскостного каналирования 11 ГэВ/а.е.м. ионов  $U^{91+}$  в кристалле Si продемонстрированы особенности RCE очень тяжелых ( $Z \gg 10$ ) релятивистских водородоподобных ионов, обсуждавшиеся в § 3.5. Показано, что влияние магнитного поля в AF на RCE может быть сравнимо с влиянием электрического поля. Обсуждаются возможности практического применения RCE таких ионов: получение ионов в состояниях с определенным значением полного момента, а также измерение Лэмбовского сдвига уровней энергии.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

### 3 ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведено решение уравнений Дирака и Клейна-Гордона для электронов и позитронов, движущихся в режиме плоскостного каналирования в непрерывном усредненном плоскостном потенциале с учетом спина частицы.
2. Показано, что обусловленные спином частиц эффекты сдвига и расщепления уровней энергии поперечного по отношению к плоскостям движения действительно очень малы по сравнению с расстоянием между уровнями энергии.
3. Впервые разработана теория RCE тяжелых релятивистских H-ионов, учитывающая тонкую структуру уровней энергии орбитально-го электрона и эффект Штарка, возникающий вследствие влияния не-

прерывного плоскостного потенциала на уровне энергии орбитального электрона.

4. На основе разработанной теории создан компьютерный код (C++), позволяющий исследовать различные характеристики RCE тяжелых релятивистских H- ионов при плоскостном каналировании. Результаты вычислений демонстрируют сильное влияние тонкой структуры уровней энергии орбитального электрона на форму резонансной кривой. Достигнуто хорошее согласие с известными экспериментальными данными по RCE тяжелых релятивистских H-ионов.

5. Показано, что для очень тяжелых релятивистских H-ионов с энергиями, превышающими ГэВ/а.е.м., помимо электрического поля, на RCE значительное влияние может оказывать и магнитное поле, возникающее в AF.

#### 4 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оцуки Е.-Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. – М.: Мир, 1985. – 280 с.
2. Кумахов М. А. Излучение каналированных частиц в кристаллах. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 160 с.
3. Базылев В. А., Жеваго Н. К. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 272 с.
4. Барышевский В. Г. Каналирование, излучение и реакции в кристаллах при высоких энергиях. – Минск: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982. – 256 с.
5. Naakon A. Olsen, Yuri Kunashenko. Phys. Rev. A. – 1997. – v. 56, no. 1. – p. 527.
6. Okorokov V. V. Physics of Atomic Nuclei. – 2007. – vol. 20, no. 7. – p. 1174.
7. Komaki K., Azuma T., Ito T., et al. Nucl. Instr. Methods B. – 1998. – v. 146. – p. 19.
8. Ito T., Takabayashi Y., Komaki K., et al. Nucl. Instr. Methods B. – 2000. – v. 164-165. – p.68.
9. Azuma T., Ito T., Takabayashi Y., et al. Physica Scripta. – 2001. – v. 92. – p. 61.
10. Azuma T., Muranaka T., Takabayashi Y., et al. Nucl. Instr. Methods B. – 2003. – v. 205. – p. 779.

11. Делоне Н. Б., Крайнов В. П. Атом в сильном световом поле. 2-е изд. перераб. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.

## 5 СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бабаев А. Зависимость спектра связанных состояний поперечной энергии каналированного электрона от его спина. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. – 2007. № 11. – с. 95.
2. Babaev A. Spin Dependence for Transverse Energy of Channeled Electrons. // Proc. of SPIE. – 2007. – v. 6634. – p. 66340A.
3. Бабаев А. А., Пивоваров Ю. Л. Резонансное когерентное возбуждение ионов  $Ag^{17+}$  в кристалле кремния: компьютерный эксперимент. // Известия ВУЗ-ов. Физика. – 2007. – т. 50, № 10/2. – с.103.
4. Бабаев А. А., Пивоваров Ю. Л. Компьютерное моделирование резонансного когерентного возбуждения ионов  $Ag^{17+}$  с учетом тонкой структуры энергетических уровней. // Известия ТПУ. – 2007. – т. 312, № 2. Математика и механика. Физика. – с. 54.
5. Бабаев А. А., Пивоваров Ю. Л. Резонансное когерентное возбуждение ионов  $Ag^{17+}$  с учетом тонкой структуры энергетических уровней. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. – 2008. - № 3. – с. 87.
6. Babaev A. A., Pivovarov Yu. L. Theory of Resonant Coherent Excitation of Relativistic Hydrogen-like Heavy Ions under Planar Channeling in a Si Crystal. // J. Phys. B. – 2008. – v. 41. – p. 195001.
7. Babaev A., Bogdanov O. V., Efremov V. I., Korotchenko K. B., Kunaashenko Yu. P., Pivovarov Yu. L., Dabagov S. B. On Crystal-assisted Processes by Means of 20-800 Mev  $e^-/e^+$  LNF Beams: Preprint – LNF-08/22(IR). LNF INFN, 2008. – 42 p.
8. Бабаев А. А., Пивоваров Ю. Л. Сложная структура пиков резонансного когерентного возбуждения тяжелых релятивистских водородоподобных ионов при плоскостном каналировании. // Поверхность Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. – 2009. - № 3. – с. 58.