

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

Стысин Алексей Владимирович

РЕЗОНАНСНОЕ КОГЕРЕНТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ  
КРИСТАЛЛЫ ВНЕ УСЛОВИЙ КАНАЛИРОВАНИЯ

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2009

Работа выполнена на кафедре физики атомного ядра и квантовой теории столкновений  
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Балашов В. В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Калашников Н. П.

кандидат физико-математических наук,  
Петухов В. П.

Ведущая организация: Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН,  
119991, Москва, ул. Вавилова 38

Защита состоится "16" октября 2009 в 15 ч. 00 мин. на заседании  
совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.77 при Московском  
государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва,  
Ленинские горы, дом 1 строение 5 («19 корпус» НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан "24" июня 2009 г.

Учёный секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.77  
доктор физико-математических наук, профессор



Страхова С. И.

*Страхова*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена эффекту резонансного когерентного возбуждения (resonant coherent excitation, RCE) многозарядных ионов при их прохождении через ориентированные кристаллы. Упорядоченно расположенные атомы кристаллической решетки создают пространственно периодическое поле, являющееся осциллирующим во времени в системе отсчета, связанной с движущимся ионом. В случае, когда частота кристаллического поля соответствует разности энергетических уровней иона, происходит его возбуждение, имеющее резонансный характер. Существование эффекта RCE было предсказано В. В. Огороковым (ИТЭФ) в 1965 г., а его первое надежное экспериментальное наблюдение было осуществлено Ш. Датцем с сотрудниками (Оак Ридж, США) в 1978 г. Начиная с этих работ, экспериментальные и теоретические исследования были сосредоточены вокруг резонансного когерентного возбуждения ионов, проходящих через кристаллы в условиях каналирования.

Новейшее развитие методики RCE-эксперимента связано с деятельностью группы японских физиков на базе Метрополитан Университета г. Токио. Ряд работ, выполненных этой группой с конца 90-х годов по настоящее время, определил качественный прорыв в экспериментальном изучении этого процесса. Отправной точкой исследований токийской группы стали эксперименты по резонансному когерентному возбуждению релятивистских водородоподобных ионов  $\text{Ar}^{17+}$  в условиях плоскостного каналирования в мишенях различной толщины. В эксперименте с каналированными релятивистскими гелиеподобными ионами  $\text{Fe}^{24+}$  впервые была установлена сильная угловая анизотропия выхода характеристического рентгеновского излучения, а следовательно, и выстроенность возбужденных состояний ионов. Использование тонкой кристаллической мишени позволило выполнить измерения фракции выживания (фракции ионов, прошедших через мишень без изменения зарядового состояния) с разрешением по отдельным траекториям ионов и исследовать локализацию процесса RCE внутри плоскостного канала. Следующим шагом стало экспериментальное открытие нового типа процесса RCE, получившего название 3D-RCE (трехмерное резонансное когерентное возбуждение), не требующего условий каналирования. Наконец, в ряде экспериментов токийской группы, как в условиях каналирования, так и вне их, были найдены эффекты двойного резонансного когерентного возбуждения, когда в результате специального подбора параметров пучка ионов (скорости и ориентации) два перехода в ионе одновременно оказываются в резонансе с различными гармониками внешнего кристаллического поля.

Актуальность теоретических и экспериментальных исследований процесса резонансного когерентного возбуждения подтверждается планами международной коллаборации SPARC (SPARC Technical Proposal 2005, p. 24, <http://www.gsi.de/fair/experiments/sparc/>) по исследованию RCE тяжелых ионов вплоть до урана на строящемся ускорительно-накопительном комплексе Future-GSI (г.Дармштадт, Германия). Кроме того, большой прогресс, достигнутый в настоящее время в эксперименте, позволяет рассчитывать на достаточно скорое начало работ по прикладным применениям эффекта. Основные надежды здесь связаны с использованием RCE как точного спектроскопического метода, а также с созданием на основе RCE перенастраиваемого рентгеновского лазера, альтернативного лазера на свободных электронах.

В диссертации детально рассматривается эффект резонансного когерентного возбуждения при прохождении многозарядных релятивистских ионов через ориентированные монокристаллы *вне условий каналирования* (3D-RCE). Данный новый тип RCE был обнаружен экспериментально токийской группой в 2006 году. Целью диссертационной работы является теоретическое исследование процесса 3D-RCE, проведение компьютерного моделирования, анализ и систематическое сравнение результатов вычислений с новейшими экспериментальными данными токийской группы для водородоподобных и гелиеподобных ионов аргона и железа, исследование эффекта угловой анизотропии характеристического электромагнитного излучения ионов в процессе 3D-RCE, изучение эффектов двойных резонансов различных типов.

В основе теоретического описания резонансного когерентного возбуждения в настоящей работе лежит метод обобщенного кинетического уравнения для матрицы плотности, разрабатываемый применительно к проблемам взаимодействия многозарядных ионов с кристаллами в НИИЯФ МГУ с середины 90-х годов. Применение этого метода в теории RCE неканализованных ионов, проведенное в ходе работы над диссертацией, позволило исследовать влияние всех основных факторов на протекание этого процесса и дать последовательное теоретическое описание целому ряду новейших экспериментов токийской группы 2006 - 2009 гг. Список работ, опубликованных по материалам диссертации, приведен в конце автореферата.

## ОСНОВНЫЕ НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РАБОТЕ

1. На основе метода обобщенного квантового кинетического уравнения для матрицы плотности впервые разработан единый теоретический подход к описанию всей совокупности наблюдаемых величин в процессе резонансного

когерентного возбуждения многозарядных релятивистских ионов, проходящих через тонкие кристаллические мишени вне условий каналирования (3D-RCE), в том числе зарядового распределения ионов на выходе из мишени, выстроенности их возбужденных состояний и угловой анизотропии их характеристического излучения. Разработана соответствующая вычислительная модель и комплекс компьютерных программ.

2. Показано, что для качественного описания экспериментальных данных по фракции выживания ионов  $\text{Ar}^{17+}$  в условиях эксперимента токийской группы достаточно учета наиболее низких гармоник кристаллического поля, удовлетворяющих резонансному условию Окорокова, и рассмотрения возбуждений иона в пределах L-оболочки. Установлено, что тонкая структура резонансных профилей фракции выживания является следствием эффекта двойного резонансного когерентного возбуждения под действием высоких гармоник кристаллического поля, приводящего к возбуждению состояний с главным квантовым числом  $n = 3$ .
3. Теоретически подтверждено возникновение выстроенности возбужденных состояний гелиеподобных ионов в процессе 3D-RCE. Установлено, что из-за малого времени жизни возбужденных состояний влияние механизмов релаксации выстроенности в случае ионов  $\text{Fe}^{24+}$  проявляется существенно слабее, чем в случае ионов  $\text{Ar}^{16+}$ .
4. Получена оценка вклада процесса Оже-распада автоионизационных состояний в формирование зарядового распределения ионов при двойном резонансном когерентном возбуждении L-типа гелиеподобных ионов  $\text{Ar}^{16+}$  вне условий каналирования, и рассчитано угловое распределение испускаемых Оже-электронов.
5. Показано, что дублетная структура резонансных профилей при двойном резонансе L-типа (эффект Отлера-Таунса) «автоматически» воспроизводится в расчетах по методу обобщенного кинетического уравнения в широком диапазоне расстроек частоты смешивающего поля. Подтверждено, что качественные особенности проявления дублета Отлера-Таунса во фракции выживания и в дифференциальном выходе характеристического излучения ионов  $\text{Ar}^{16+}$  определяются взаимной ориентацией векторов электрического поля резонирующих гармоник кристаллического поля в системе покоя иона.

В случае ионов  $\text{Fe}^{24+}$  особенности наблюдаемого резонансного профиля выхода рентгеновского излучения интерпретированы как проявление эффекта Отлера-Таунса.

Научная и практическая ценность. В диссертации развит теоретический подход к описанию процесса резонансного когерентного возбуждения многозарядных релятивистских ионов, проходящих через тонкие кристаллические мишени вне условий каналирования. Достигнуто хорошее согласие результатов расчетов с данными новейших экспериментов токийской группы. В дальнейшем разработанный метод может быть полезен при теоретическом анализе новых экспериментов по резонансному когерентному возбуждению, а также служить основой для дальнейшего развития теории этого процесса.

Личный вклад автора состоит в разработке на основе метода обобщенного кинетического уравнения для матрицы плотности вычислительной модели процесса резонансного когерентного возбуждения многозарядных релятивистских ионов в монокристаллах вне условий каналирования, проведении всех расчетов, сравнении с данными эксперимента и анализе результатов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации теоретический анализ экспериментальных результатов токийской группы по резонансному когерентному возбуждению вне условий каналирования и по двойному резонансному когерентному возбуждению впервые проводится на основе последовательного квантовомеханического статистического подхода. Применяемый в работе метод описания RCE, основанный на представлении о проходящем через кристалл ионе как об открытой квантовой системе, разрабатывается в НИИЯФ МГУ с середины 90-х годов. В его основе лежит обобщенное квантовое кинетическое уравнение (master equation) для матрицы плотности каналированного иона, позволяющее осуществить учет как когерентного взаимодействия электронной оболочки иона с кристаллическим полем, так и некогерентных взаимодействий иона с окружающей средой. Формализм матрицы плотности дает возможность с единых позиций рассматривать динамику процесса RCE, параметры выстроенности возбужденных состояний, выход и угловое распределение продуктов их распада. При этом учитываются тепловые колебания решетки, приводящие к нарушению строгой упорядоченности ионов кристаллической решетки, торможение проходящих ионов, действие внешних статических полей и другие факторы.

Первоначально метод был применен для теоретического описания экспериментов по RCE легких каналированных ионов. Впоследствии он был обобщен на случай плоскостного каналирования релятивистских ионов, и было достигнуто количественное теоретическое описание экспериментов токийской группы с релятивистскими водородоподобными ионами  $\text{Ar}^{17+}$ . Метод обобщенного кинетического уравнения лег в основу детального теоретического анализа наблюдавшейся в эксперименте токийской группы сильной анизотропии характеристического электромагнитного излучения при резонансном когерентном возбуждении каналированных ионов  $\text{Fe}^{24+}$ . В рамках метода было впервые достигнуто теоретическое описание эксперимента по двойному резонансному когерентному возбуждению, и поставлен вопрос о выходе и угловом распределении Оже-электронов в процессе RCE. Предпринимаемая в диссертации работа представляет собой продолжение указанных теоретических исследований и неотъемлемую часть всего направления исследований по теории взаимодействия многозарядных ионов с кристаллами, проводимых в НИИЯФ МГУ. Важное значение для работы имеет тесное взаимодействие группы НИИЯФ МГУ с экспериментаторами токийской группы, включающее обмен данными и широкие обсуждения всех аспектов эффекта резонансного когерентного возбуждения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 127 страниц, включая 5 таблиц и 31 рисунок. Список литературы содержит 85 позиций. К диссертации в электронном виде прилагается комплекс вычислительных программ и набор входных данных для проведения расчетов.

Во введении обоснована актуальность теоретического исследования эффекта резонансного когерентного возбуждения вне условий каналирования, дан обзор экспериментальных данных и статуса теоретических исследований по этой проблеме, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты и их практическая ценность, описана структура диссертации.

В главе 1 проведено расширение метода обобщенного квантового кинетического уравнения на случай резонансного когерентного возбуждения вне условий каналирования с учетом условий прохождения ионов через кристалл в недавних экспериментах токийской группы. В §1.1 введены основные понятия метода обобщенного кинетического уравнения (используются атомные единицы  $\hbar = e = m_e = 1$ )

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = -i [\hat{H}, \hat{\rho}] + \hat{R}\hat{\rho}, \quad (1)$$

для матрицы плотности  $\hat{\rho}$  электронной оболочки иона, проходящего через кристалл. Гамильтониан  $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{V}(t)$  состоит из суммы гамильтониана свободного иона  $\hat{H}_0$  и оператора взаимодействия иона с внешним кристаллическим полем  $\hat{V}(t)$ . Релаксационный оператор  $\hat{R}$  отвечает за описание некогерентных взаимодействий электронной оболочки иона с окружающей средой. В базисе собственных состояний свободного иона ( $|p\rangle = |1\rangle, \dots, |N\rangle$ ) в энергетическом представлении ( $\rho_{pq}(t) = \langle p | \hat{\rho}(t) | q \rangle e^{i\omega_{pq}t}$ ,  $V_{pq}(t) = \langle p | \hat{V}(t) | q \rangle e^{i\omega_{pq}t}$ ) обобщенное кинетическое уравнение переписывается в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \rho_{pp}}{\partial t} = 2 \sum_s \text{Im} [V_{ps}(t) \rho_{sq}(t)] - \lambda_p^{tot}(t) \rho_{pp}(t) + \sum_{q \neq p} \lambda_{qp}(t) \rho_{qq}(t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_{pq}}{\partial t} = -i \sum_s [V_{ps}(t) \rho_{sq}(t) - \rho_{ps}(t) V_{sq}(t)] - \frac{\lambda_p^{tot}(t) + \lambda_q^{tot}(t)}{2} \rho_{pq}(t), \quad (p \neq q), \quad (3)$$

где  $\lambda_{pq}(t)$  - скорости прямых переходов между состояниями  $|p\rangle$  и  $|q\rangle$ , вызванных некогерентными взаимодействиями с окружающей средой, в том числе спонтанным высвечиванием возбужденных состояний. Величина  $\lambda_p^{tot}(t) = \lambda_p^{out}(t) + \sum_{q \neq p} \lambda_{pq}(t)$  представляет собой полную скорость выхода из состояния  $|p\rangle$ . В §1.2 на основе сформулированных понятий подробно обсуждается модель резонансного когерентного возбуждения в двухуровневой системе. В §1.3 рассмотрено электростатическое поле кристаллической решетки кремния. Получены явные выражения потенциала поля в лабораторной системе отсчета в виде Фурье-разложения

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_{klm} F_{klm} e^{i\mathbf{G}_{klm}\mathbf{r}} \quad (4)$$

с коэффициентами

$$F_{klm} = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^3 f_{klm} e^{-\frac{1}{6}G_{klm}^2 \langle r^2 \rangle} \tilde{u}_0(G_{klm}), \quad (5)$$

где  $f_{klm} = 2(1 + (-i)^{2m+l})(1 + (-1)^{k+l+m})$  - структурный фактор,  $\mathbf{G}_{klm}$  - векторы обратной решетки. Фактор Дебая-Валлера  $e^{-\frac{1}{6}G_{klm}^2 \langle r^2 \rangle}$  введен для учета тепловых колебаний решетки. В вычислениях в качестве потенциала одиночного атома кристалла  $\tilde{u}_0$  используется аналитическая аппроксимация Мольера потенциала Томаса-Ферми. В §1.4 рассмотрены особенности движения ионов в кристалле кремния вне условий каналирования и описана процедура перехода в систему покоя иона с учетом релятивистского характера его движения. Получены выражения для скалярного

$$\varphi'(\mathbf{r}', t') = \gamma \sum_{klm} F_{klm} e^{i\mathbf{G}_{klm}\mathbf{R}_0} e^{i\gamma v(\mathbf{G}_{klm})_x t'} e^{i\mathbf{G}'_{klm}\mathbf{r}'} \quad (6)$$

и векторного потенциалов

$$A'_x(\mathbf{r}', t') = -\gamma \frac{v}{c} \sum_{klm} F_{klm} e^{i\mathbf{G}_{klm} \mathbf{R}_0} e^{i\gamma v (\mathbf{G}_{klm})_x t'} e^{i\mathbf{G}'_{klm} \mathbf{r}'}, \quad (7)$$

$$A'_y = A'_z = 0, \quad (8)$$

а также вектора электрического поля в этой системе. В §1.5 рассмотрен гамильтониан взаимодействия электронной оболочки иона с внешним кристаллическим полем:

$$H' = -\frac{i}{c} (\mathbf{A}' \cdot \nabla) - \frac{i}{2c} (\nabla \cdot \mathbf{A}') - \varphi'. \quad (9)$$

Вычислены матричные элементы оператора  $H'$  в обкладках собственных состояний свободного иона. В §1.6 резонансное условие Огорокова

$$\Delta E = \frac{2\pi}{a} \gamma v (\sqrt{2}(k \cos \phi + m \sin \phi) \cos \theta + l \sin \theta), \quad (10)$$

связывающее энергию возбуждения иона  $\Delta E$  со скоростью иона  $v$  и с углами ориентации пучка  $(\theta, \phi)$  относительно кристаллической решетки, вводится и обсуждается применительно к прохождению ионов через кристалл вне условий каналирования. В §1.7 описаны процедуры вычисления наблюдаемых в экспериментах по RCE величин в рамках метода матрицы плотности и обобщенного кинетического уравнения. В §1.8 дан краткий обзор используемых в диссертации данных по сечениям релаксационных процессов взаимодействия иона с окружающей кристаллической средой. В §1.9 дан краткий обзор основных результатов применения метода обобщенного квантового кинетического уравнения для матрицы плотности в теории резонансного когерентного возбуждения релятивистских водородоподобных и гелиеподобных ионов при прохождении через кристалл кремния в условиях плоскостного каналирования.

**В главе 2** подробно рассматривается резонансное когерентное возбуждение неканализованных водородоподобных ионов  $\text{Ar}^{17+}$  с энергией 391 МэВ/н. В §2.1 обсуждается фракция выживания ионов и угловое распределение характеристического рентгеновского излучения. Проводится подробное сравнение результатов расчетов по методу обобщенного кинетического уравнения с опубликованными данными эксперимента токийской группы. На основе дипольного приближения качественно анализируется характер анизотропии выхода фотонов. В §2.2 произведен учет эффекта двойного резонансного когерентного возбуждения, приводящего к заселению состояний М-оболочки (Рис. 1). Достигнуто существенное улучшение согласия результатов расчета и эксперимента в отношении тонкой структуры резонансных профилей.

**В главе 3** подробно рассматривается резонансное когерентное возбуждение релятивистских гелиеподобных ионов  $\text{Ar}^{16+}$  и  $\text{Fe}^{24+}$  вне условий каналирования и

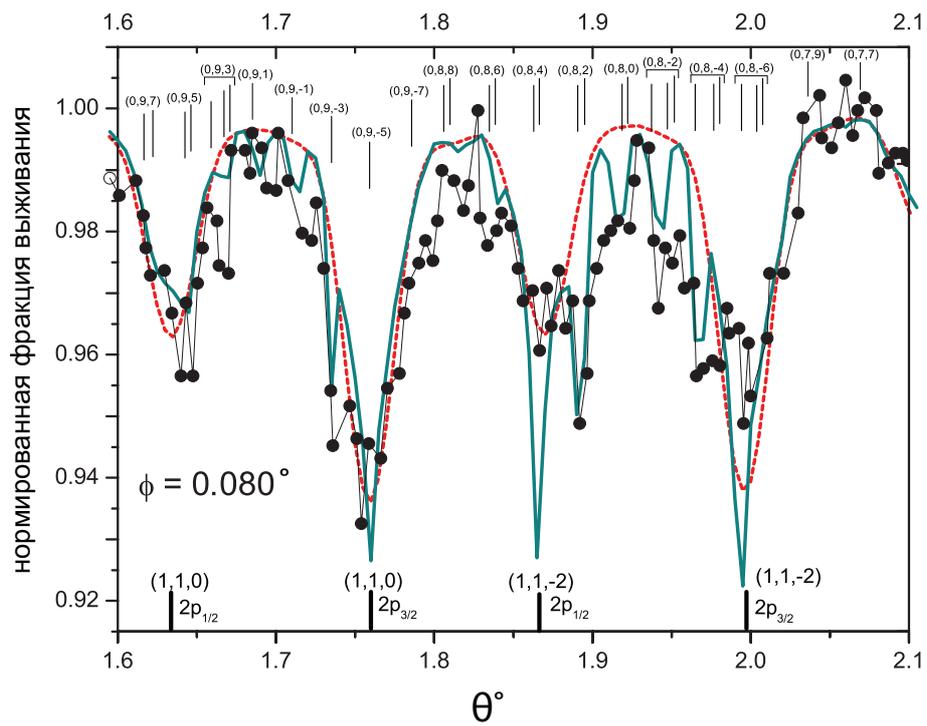


Рис. 1. Фракция выживания ионов  $\text{Ar}^{17+}$  при прохождении через кристаллическую мишень кремния толщиной 1  $\mu\text{m}$  для случая  $\phi = 0.080^\circ$ . Пунктир — расчет без учета двойных резонансов, жирная сплошная — с учетом двойных резонансов L-типа. Вертикальными линиями показаны теоретические положения резонансных провалов, рассчитанные по резонансному условию (10).

проводится систематическое сравнение результатов численных расчетов с имеющимися в настоящее время экспериментальными данными. В §3.1 рассматривается выстроенность возбужденных состояний ионов при одинарном резонансе. Достигнуто хорошее согласие с данными эксперимента. Дана качественная интерпретация результатов на основе дипольного приближения. Обсуждаются возможные механизмы релаксации выстроенности в случае RCE ионов  $\text{Ar}^{16+}$ . В §3.2 рассматривается двойной резонанс L-типа в ионах  $\text{Ar}^{16+}$  с возбуждением автоионизационных состояний. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета и данных эксперимента по фракции выживания без введения подгоночных параметров. Рассмотрен вопрос о выходе и угловом распределении Оже-электронов при распаде автоионизационных состояний. На основе дипольного приближения получена качественная интерпретация ожидаемого углового распределения. В §3.3 рассматриваются двойные резонансы  $\Lambda$ -типа и эффект Отлера-Таунса при резонансном когерентном возбуждении ионов  $\text{Ar}^{16+}$  (Рис. 2) и  $\text{Fe}^{24+}$ . Проводится подробное сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными по фракции выживания, выходу ионов в метастабильных состояниях и угловому распределению характеристического рентгеновского излучения. В большинстве случаев достигнуто убедительное качественное согласие и удовлетворительное количественное согласие результатов вычислений и данных измерений без введения подгоночных параметров.

**В главе 4** дано подробное описание программно-математического аппарата, используемого при проведении расчетов. В §4.1 проведено вычисление матричных элементов оператора возбуждения. В §4.2 даны формулы для угловых распределений продуктов распада возбужденных состояний на основе аппарата статистических тензоров. В §4.3 приведено описание численных методов и компьютерных программ, разработанных для проведения вычислений.

**В Заключении** приводится краткое обсуждение основных результатов и выводов работы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. На международной конференции «Swift Heavy Ions in Matter» (г. Ашаффенбург, Германия, 2005 г.).
2. На международной конференции «Highly Charged Ions» (г. Белфаст, Великобритания, 2006 г.).

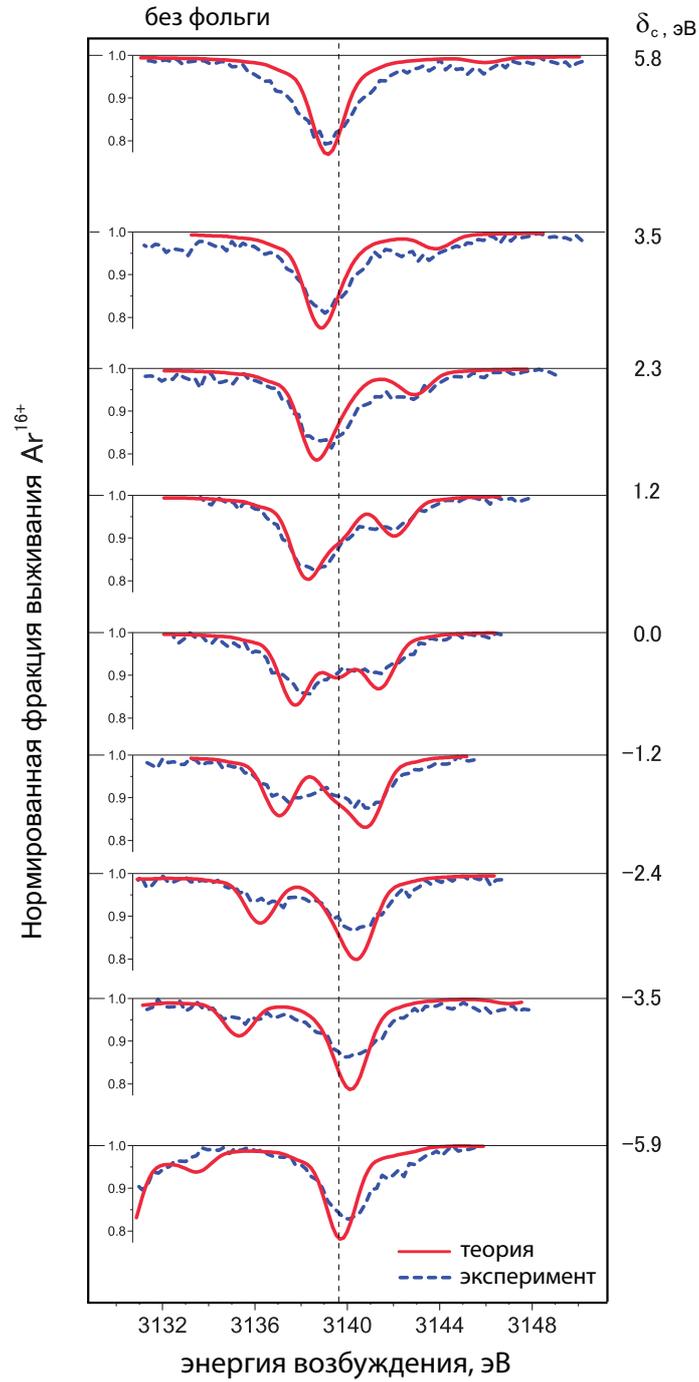


Рис. 2. Фракция выживания ионов  $\text{Ar}^{16+}$  с энергией 416 МэВ/н при прохождении через кристаллическую мишень кремния толщиной 1 мкм в условиях двойного резонанса  $\Lambda$ -типа на гармониках  $(k_1, l_1, m_1) = (1, -1, -2)$  и  $(k_2, l_2, m_2) = (1, -1, 0)$  для различных значений расстройки  $\delta_c$ .

3. На международной конференции «International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions» (г. Фрайбург, Германия, 2007 г.).
4. На международных совещаниях «Atomic Physics Workshop» (г. Дрезден, Германия, 2007 и 2008 г.).
5. На международной конференции «Swift Heavy Ions in Matter» (г. Лион, Франция, 2008 г.).
6. На международной конференции «Highly Charged Ions» (г. Токио, Япония, 2008 г.).
7. На научных семинарах в НИИЯФ МГУ, ИТЭФ, Институте Хана-Майтнер (г. Берлин, Германия), Институте Макса Планка (г. Хайдельберг, Германия), Метрополитан Университете г. Токио (Япония).

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. *Bahmina K. Yu., Balashov V. V., Sokolik A. A., Stysin A. V.*, Stark mixing of ionic intermediate states in radiative recombination of channeled ions // HCI 2006 International Conference, Book of Abstracts, p. 3-5.
2. *Bahmina K. Yu., Balashov V. V., Sokolik A. A., Stysin A. V.*, Stark mixing of ionic intermediate states in radiative recombination of channeled ions // Journal of Physics: Conference Series vol. 58 (2007) p. 327 - 331.
3. *Balashov V. V., Stysin A. V.*, Angular correlation between cascade photons in radiative and dielectronic recombination of highly charged channeled ions // ICPEAC 2007 International Conference on Atomic, Electronic and Ionic Collisions, Book of Abstracts, p. We151.
4. *Балашов В. В., Стысин А. В.*, Угловая корреляция каскадных фотонов в процессе диэлектронной рекомбинации каналированных ионов // Вестник Московского Университета, Серия 3, Физика, Астрономия, №5 (2007), с. 18 - 23.
5. *Balashov V. V., Sokolik A. A., Stysin A. V.*, Characteristic X-ray radiation and Auger electrons from resonant coherently excited highly charged ions under channeling // SHIM 2008 International Symposium Swift Heavy Ions in Matter 2008, Book of Abstracts, p. PB07.

6. Балашов В. В., Соколик А. А., Стысин А. В., Угловая анизотропия характеристического рентгеновского излучения и Оже-электронов в процессе резонансного когерентного возбуждения релятивистских ионов при плоскостном каналировании // ЖЭТФ т. 134 (2008), вып. 1., с. 164 - 171.
7. Balashov V. V., Bodrenko I. V., Dolinov V. K., Sokolik A. A., Stysin A. V., Density matrix description of resonant coherent excitation of swift highly charged ions in oriented crystals // HCI 2008 International Conference Highly Charged Ions 2008, Book of Abstracts, p. ST-19.
8. Balashov V. V., Sokolik A. A., Stysin A. V., Characteristic X-ray radiation and Auger electrons from resonant coherently excited highly charged ions under channeling // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 267 (2009), p. 905 - 907.
9. Балашов В. В., Соколик А. А., Стысин А. В., Кинетика двойного резонансного когерентного возбуждения релятивистских многозарядных ионов в кристаллах вне условий каналирования // ЖЭТФ т. 135 (2009), вып. 6, с. 1162 - 1172.
10. Balashov V. V., Sokolik A. A., Stysin A. V., Angular anisotropy of the RCE X-rays under planar channeling as manifestation of geometric properties of the in-crystal electric field // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 267 (2009), p. 1772-1778.

Автореферат

Алексей Владимирович Стысин

Резонансное когерентное возбуждение релятивистских многозарядных ионов при прохождении через ориентированные кристаллы вне условий каналирования

Тираж 100 экз. Заказ № Т-000

Отпечатано в типографии «КДУ»  
Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)