

**НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ ЗА 2012 ГОД**  
**по гранту Президента Российской Федерации**  
**для государственной поддержки**  
**молодых российских учёных**  
**за счёт средств федерального бюджета**  
**МК-6509.2012.2**

**1. Номер гранта:**

МК-6509.2012.2

**2. Фамилия, имя, отчество:**

Грызлова Елена Владимировна

**3. Тема научного исследования:**

Взаимодействие малых квантовых систем с импульсами интенсивного крайнего ультрафиолетового и рентгеновского излучения, генерируемого новым поколением лазеров на свободных электронах.

**4. Полученные за отчетный период научные (научно-технические) результаты:**

В текущем году были заложены основы теоретического описания нелинейных недипольных явлений, наблюдаемых при взаимодействии малых квантовых систем с высокочастотным интенсивным излучением. Были исследованы два случая, для которых ожидалось значительное проявление недипольных эффектов: последовательная двойная двухфотонная ионизация атома полем интенсивного лазера с частотой в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) или мягкого рентгена, и однократная ионизация атома при совместном воздействии полей рентгеновского и оптического диапазонов. Постановка задачи обсуждалась с научными группами, работающими на лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) и соответствует условиям экспериментов, реализуемых сейчас на XFEL (Гамбург), LCLS (Стэнфорд), SCSS (Хуого), FERMI (Триест). Результаты обсуждений опубликованы и доложены на конференциях. Поставленные на 2012 г. задачи выполнены полностью, выполнена часть подготовительных работ для исследований, планируемых в 2013 году.

Для первой поставленной задачи - последовательной кратной ионизации атомов - были получены общие выражения для угловых распределений и корреляций фотоэлектронов, учитывающие высшие порядки мультипольного разложения оператора взаимодействия электромагнитного поля атомом. Затем общие аналитические выражения были упрощены для описания и анализа самых значимых недипольных поправок возникающих при последовательной двойной двухфотонной ионизации (ПДДИ) валентной оболочки атомов инертных газов, вызванных интерференцией электрической дипольной (E1) и электрической квадрупольной (E2) или магнитной дипольной (M1) амплитуд. Угловые распределения были представлены в традиционной форме как сумма сферических гармоник различных рангов взятых с безразмерными динамическими

коэффициентами – параметрами асимметрии. Общий анализ позволил выделить вклад вызванный поляризацией промежуточного состояния, возникшей на предшествующей ступени ионизации и исследовать влияние условий заселения подуровней тонкой структуры промежуточного иона  $pr^{5^2P_{3/2,1/2}}$ . Например, показано, что в случае полностью когерентного заселения эффекты поляризации промежуточного иона ровно в два раза больше, чем в случае полностью некогерентного заселения. Условия заселения промежуточного иона могут различаться от эксперимента к эксперименту и зависят от длительности и когерентности лазерного импульса, возможности деполяризации, величины тонкого расщепления и ширины подуровней тонкой структуры.

Для энергий фотона ниже 1.5 КэВ были выполнены расчеты параметров асимметрии угловых распределений в ПДДИ атома неона. Атом неона был выбран, поскольку ранее теоретические и экспериментальные исследования однофотонной ионизации синхротронным излучением обнаружили для него наиболее сильные среди инертных газов недипольные эффекты. Сравнение ранних исследований однофотонной ионизации и наших расчетов первой ступени ПДДИ выступило в качестве теста при выборе спектроскопической модели. Расчеты второй ступени ПДДИ показали, что начиная с энергии фотонов 100 эВ можно наблюдать нелинейные недипольные эффекты, роль которых возрастает с увеличением энергии фотонов. Нелинейные недипольные эффекты характеризуются появлением параметров угловой асимметрии высоких рангов и усложнением формы угловых распределений. Величина недипольных эффектов оказалась значительной, так асимметрия вероятности фотоэлектронов вылететь вдоль и против направления распространения лазерного поля меняется от 2% до 20% при энергии фотонов в диапазоне от 100 эВ до 1.5 КэВ.

На основании расчетов и анализа общих выражений были выделены наиболее яркие проявления недипольных эффектов и даны рекомендации к постановке эксперимента: указаны углы детектирования фотоэлектронов и оптимальные энергии фотонов.

Опубликованная нами в этом году работа [J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 45, 215602, 2012] является первым исследованием нелинейных недипольных эффектов, вызванных излучением диапазона вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена.

Для второй задачи – однократной ионизации атома комбинированным воздействием двух лазеров различных частот - были получены общие выражения угловых распределений фотоэлектронов в зависимости от поляризации полей. Был выполнен анализ общих выражений для коллинеарных пучков и различных комбинаций поляризаций (линейная + линейная, линейная + циркулярная, циркулярная + циркулярная) и определено, какими параметрами можно характеризовать угловые распределения фотоэлектронов в каждом случае. Получены формулы для линейного и циркулярного дихроизма в угловых распределениях фотоэлектронов. В настоящее время ведутся расчеты этих параметров для двухфотонной ионизации внутренней 1s оболочки неона. Проблема потребовала разработки программного обеспечения для расчетов амплитуд двухфотонных переходов, включая переходы между состояниями непрерывного спектра, что и было

сделано в текущем году.

## **5. Ожидаемые направления дальнейшего использования полученных за отчетный период результатов**

Начатые в этом году исследования последовательной кратной ионизации, будут распространены с неона на другие атомы и оболочки, чтобы выявить наиболее подходящие системы для наблюдения. Расчеты наблюдаемых характеристик будут выполнены для атомов, для которых ожидаются значительные проявления нелинейных недипольных эффектов. Будет исследовано влияние недипольных эффектов на функции угловых корреляций фотоэлектронов в ПДДИ.

Для задачи однократной двухфотонной ионизации комбинированным полем двух лазеров, будут выполнены расчеты угловых распределений фотоэлектронов при ионизации  $1s$  оболочки атома неона, и  $2s$ ,  $2p_{1/2}$ ,  $2p_{3/2}$  оболочек атома криптона. Расчеты будут проведены для различных экспериментально реализуемых комбинаций поляризаций полей. Также будут рассчитаны линейный и циркулярный дихроизмы в угловых распределениях фотоэлектронов, их анализ позволит значительно прояснить механизм взаимодействия высокочастотного электромагнитного излучения с атомами.

Созданное программное обеспечение будет развито для расчета амплитуд переходов произвольного порядка мультипольности. Соответствующие расчеты позволят определить условия для наблюдения интерференции электрических октупольных ( $E_3$ ) и дипольных амплитуд переходов ( $E_1$ ) и сравнить их с влиянием электрических квадрупольных амплитуд ( $E_2$  &  $E_2$ ).

Будет исследована возможность возбуждения квадрупольных автоионизационных резонансов атомов и ионов инертных газов в двух- и трехфотонных процессах. Будет рассмотрена возможность точной селекции между близлежащими автоионизационными состояниями при помощи двух полей разных поляризаций.

Проведенные исследования позволят описать имеющиеся, пока немногочисленные, экспериментальные данные и дать рекомендации к постановке эксперимента. Изучение взаимодействия атомов и ионов с электромагнитными полями послужит основой для понимания соответствующих процессов в более сложных квантовых системах. Данные исследования позволят расширить область применимости теории нелинейных процессов на высокочастотные диапазоны.

## 6. Выполнение заданных индикаторов:

№	Наименование индикатора	Ед. изм.	2012 г. план	2012 г. факт
1	Количество основных научных публикаций (монографии, учебники, учебные пособия, статьи, тезисы докладов)	ед.	12	16
2	Участие в конференциях, школах - семинарах, выставках и симпозиумах	ед.	7	11
3	Количество подготовленных и читаемых курсов лекций	ед.	1	1
4	Количество подготовленных кандидатских диссертаций под руководством грантополучателя	ед.	0	0
5	Количество привлекаемых к НИР соисполнителей	ед.	3	3

### 6.1. Публикации грантополучателя за отчетный период по заявленной тематике:

- Общее количество публикаций: 16

В том числе:

- монографий: 0

- учебников, учебных пособий: 0

- статей: 6

- тезисов докладов: 10

Из них:

- количество публикаций в российских научных изданиях: 3

- количество публикаций в зарубежных научных изданиях: 13

№ п/п	Авторы, название публикации	Вид публикации	Город, издательство	Год издания	Кол-во страниц
1	A.N. Grum - Grzhimailo, E.V. Gryzlova and M. Meyer Non - dipole effects in the angular distribution of photoelectrons in sequential two - photon atomic double ionization	Статья	Bristol J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 45, 215602	2012	9
2	Е.В. Грызлова, А.Н. Грум - Гржимайло, Е.И. Кузьмина, С.И. Страхова О возможности наблюдения нелинейных недипольных эффектов с излучением лазера на свободных электронах	Статья	Москва Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына; Труды 13–й межвузовской школы "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", стр. 87	2012	8

3	А.Н. Грум - Гржимайло, Е.В. Грызлова, А.С. Битюцкая (Четверкина) Нелинейные явления в атомах при взаимодействии с излучением ВУФ и мягкого рентгеновского диапазонов	Статья	Ужгород Вестник Ужгородского университета, серия «физика», 32, стр. 67	2012	6
4	М.Н. Хаердинов, А.Н. Грум - Гржимайло, Е.В. Грызлова, К. Bartschat Резонансная фотоионизация атома водорода интенсивными фемтосекундными импульсами	Статья	Москва Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына; Труды 13-й межвузовской школы "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", стр. 94	2012	7
5	E.V. Gryzlova, A.N. Grum - Grzhimailo, N.M. Kabachnik, S. Fritzsche Angular distributions and correlations in sequential three - photon triple atomic ionization	Статья	Bristol J. Phys.: Conference Series 388, 012031	2012	7
6	E.V. Gryzlova, A.N. Grum - Grzhimailo, A.S. Bityutskaya, S.I. Strakhova  New trends in sequential two - and three - photon double ionization.	Тезисы доклада	Berlin Book of abstract of International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces, p. 53	2012	1
7	A.N. Grum - Grzhimailo, E.V. Gryzlova, A.S. Bityutskaya, M. Meyer Angular distribution of photoelectrons beyond the dipole approximation in two - photon ionization at Free - Electron lasers	Тезисы доклада	Hamburg Conference Program, Useful Information and Book of Abstract of "Science at FELs" SRI 2012 satellite meeting, p. N10	2012	1

8	E.V. Gryzlova, A.N. Grum - Grzhimailo, S. Fritzsche, N.M. Kabachnik, S.I. Strakhova and A.S. Bityutskaya Stepwise two - and three - photon atomic ionization processes in VUV caused by FEL pulses	Тезисы доклада	Hamburg Conference Program, Useful Information and Book of Abstract of "Science at FELs" SRI 2012 satellite meeting, p. N38	2012	1
9	A.N. Grum - Grzhimailo, E.V. Gryzlova, S. Fritzsche, N. M. Kabachnik  Two - and Three - Photon Atomic Double Ionization by Intense FEL Pulses	Тезисы доклада	Gothenburg 44th Conference of the European Group on Atomic Systems (EGAS), p. 19	2012	1
10	A.N. Grum - Grzhimailo, E.V. Gryzlova, A.S. Bityutskaya, S.I. Strakhova Beyond the dipole approximation in two - photon ionization at FELs	Тезисы доклада	Moscow Program and Abstracts of International workshop "Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation", p. 16	2012	1
11	A.S. Bityutskaya, E.V. Gryzlova, A.N. Grum - Grzhimailo, S.I. Strakhova Non - resonant transitions in sequential three - photon double atomic photoionization of noble gases in the XUV	Тезисы доклада	Moscow Program and Abstracts of International workshop "Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation", p.15	2012	1
12	E.V. Gryzlova, A.N. Grum - Grzhimailo, N.M. Kabachnik, S.I. Strakhova  Manifestation of discrete and autoionizing states in sequential atomic ionization by few XUV photons	Тезисы доклада	Moscow Program and Abstracts of International workshop "Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation", p.14	2012	1
13	M.N. Khaerdinov, A.N. Grum - Grzhimailo, E.V. Gryzlova, S.I. Strakhova  Ionization of atomic and trapped hydrogen by intense short VUV pulses	Тезисы доклада	Moscow Program and Abstracts of International workshop "Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation", p.22	2012	1

14	А.С. Четвёркина, Е.В. Грызлова, А.Н. Грум - Гржимайло, С.И. Страхова, С.Н. Голованов Пертурбативная теория последовательной трёхфотонной двойной ионизации атомов инертных газов	Статья	Москва Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына; Труды 13-й межвузовской школы "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", стр. 100	2012	4
15	А.Н. Грум - Гржимайло, Е.В. Грызлова, А.С. Битюцкая Нелинейные явления в атомах при взаимодействии с излучением ВУФ и мягкого рентгеновского диапазонов	Тезисы доклада	Ужгород Book of abstract of Int. Conf. on Current Trends in Atomic Physics and Spectroscopy, p.50	2012	2

6.2. Участие грантополучателя в отчетном году в научных конференциях, школах-семинарах, выставках и симпозиумах по тематике проводимых исследований:

- отечественные мероприятия: 4

№ п/п	Вид и наименование мероприятия	Место проведения мероприятия	Дата начала	Дата окончания	Тема доклада
1	научная конференция Ломоносовские чтения 2012	Москва	16.04.2012	25.04.2012	Ионизация атомов и ионов лазером на свободных электронах: выход за пределы дипольного приближения
2	13-я межвузовская школа "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"	Москва	19.11.2012	20.11.2012	О возможности наблюдения нелинейных недипольных эффектов с излучением лазера на свободных электронах
3	13-я межвузовская школа "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"	Москва	19.11.2012	20.11.2012	Резонансная фотоионизация атома водорода интенсивными фемтосекундными импульсами
4	Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов - 2012»	Москва	09.04.2012	13.04.2012	Переходы между состояниями одинаковой четности в двойной трёхфотонной ионизации атомов инертных газов импульсами лазера на свободных электронах

- зарубежные мероприятия: 7

№ п/п	Вид и наименование мероприятия	Место проведения мероприятия	Дата начала	Дата окончания	Тема доклада
1	International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces	Berlin, Germany	27.08.2012	01.09.2012	New trends in sequential two - and three - photon double ionization
2	“Science at FELs” SRI 2012 satellite meeting	Hamburg, Germany	15.07.2012	18.07.2012	Angular distribution of photoelectrons beyond the dipole approximation in two - photon ionization at Free - Electron lasers
3	“Science at FELs” SRI 2012 satellite meeting	Hamburg, Germany	15.07.2012	18.07.2012	Stepwise two - and three - photon atomic ionization processes in VUV caused by FEL pulses
4	International workshop “Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation”	Moscow, Russia	24.05.2012	25.05.2012	Beyond the dipole approximation in two - photon ionization at FELs
5	International workshop “Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation”	Moscow, Russia	24.05.2012	25.05.2012	Non - resonant transitions in sequential three - photon double atomic photoionization of noble gases in the XUV
6	International workshop “Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation”	Moscow, Russia	24.05.2012	25.05.2012	Manifestation of discrete and autoionizing states in sequential atomic ionization by few XUV photons
7	International workshop “Correlation and Polarization Phenomena in Ionization of Dilute Species by XUV and X - ray Radiation”	Moscow, Russia	24.05.2012	25.05.2012	Ionization of atomic and trapped hydrogen by intense short VUV pulses

### 6.3. Научно-педагогическая деятельность:

- подготовленные и читаемые курсы лекций: 1

№ п/п	Название учебного заведения	Название лекционного курса
1	Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет	Волны света и вещества

- количество дипломных работ, подготовленных под руководством грантополучателя: 0

- подготовлены кандидатские диссертации: 0

- количество публикаций соисполнителей, подготовленных совместно или под руководством грантополучателя по заявленной тематике: 10

- участие соисполнителей в выполнении исследований по гранту за отчетный период: 3

№ п/п	Ф.И.О. соисполнителя	Статус	Краткое описание выполненной работы
1	Кузьмина Екатерина Игоревна	студенты	Разработано программное обеспечение для расчетов электрических мультипольных матричных элементов связано - связанных и связано - свободных переходов в атомах и ионах. Выполнен обзор литературы по данному вопросу.
2	Битюцкая Анастасия Сергеевна	аспиранты	Получены общие формулы угловых распределений фотоэлектронов при двухфотонной ионизации поляризованных состояний. Формулы упрощены в рамках одноэлектронной модели.
3	Битюцкая Анастасия Сергеевна	аспиранты	Разработано программное обеспечение для расчетов матричных элементов двухфотонных переходов во втором порядке теории возмущений.

## 7. Участие молодых ученых в конкурсах на проведение научно-исследовательских работ

7.1 Участие в рамках мероприятий ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы, в том числе и соисполнителей

7.1.1. Мероприятие 1.2.1. Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук: 0

7.1.2. Мероприятие 1.2.2. Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук: 0

7.1.3. Мероприятие 1.3.1. Проведение научных исследований молодыми учеными-кандидатами наук: 0

7.1.4. Мероприятие 1.3.2. Проведение научных исследований целевыми аспирантами: 0

7.2 Выполнение исследований по ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса на 2007-2012 годы" и/или по другим ФЦП, академическим, отраслевым программам; по приоритетным направлениям; по грантам РФФИ и РГНФ, а также по международным грантам за отчетный период: 1

№ п/п	Организатор конкурса	Регистрационный номер	Степень участия	Сроки реализации
1	Министерство образования и науки Российской Федерации	07.514.11.4126	Организация - соисполнитель	2012 - 2013

## 8. Общественное признание:

Премии, медали, дипломы: 4

- международные: 1

- государственные: 0

- отечественных научных сообществ: 3

№ п/п	Вид признания	Уровень награды	Наименование органа (организации, научного сообщества), выдавшей награду	Год признания
1	Диплом (и премия) за конкурс научных работ молодых ученых Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова	Отечественных научных сообществ	Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова	2012

2	Конкурс молодых ученых - физиков со степенью кандидата наук	Отечественных научных сообществ	Фонд некоммерческих программ «Династия»	2012
3	Программа национальных стипендий «Для женщин в науке»	Международные	L'OREAL - UNESCO «For Women in Science»; при участии Российской академии наук, Комиссии Российской Федерации по делам ЮНЕСКО, Бюро ЮНЕСКО в Москве	2012
4	Стипендия МГУ для преподавателей и научных сотрудников	Отечественных научных сообществ	Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова	2012

### 9. Патенты, полученные за отчетный период:

Общее количество патентов: 0

### 10. Адреса ресурсов в Internet, подготовленных грантополучателем:

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/waves/index.html>

### 11. Участие грантополучателя в экспедициях:

Грантополучатель

\_\_\_\_\_ / Грызлова Е. В. /