

Реферат

Перечень ключевых слов

Ядро, ядерные реакции, деление, изотопы, оптическая модель, ядерное обратное рассеяние, радиофармпрепарат, дозы облучения.

nucleus, nuclear reactions, fission, isotopes, optical model, nuclear backscatter, radiopharmaceutical, dose

Цель НИР: развитие новых теоретических и экспериментальных подходов к изучению механизмов ядерных реакций и свойств образующихся в реакциях ядерных систем в области низких и средних энергий, а также новых подходов к решению прикладных задач, включая анализ свойств новых материалов и ядерную медицину.

Основные задачи второго этапа НИР:

- Исследование влияния условий, реализующихся во входном канале реакций с тяжелыми ионами, на их механизмы.
- Исследование эволюции нейтронной одночастичной структуры ядер в направлении границ нуклонной стабильности
- Развитие метода спектроскопии ядерного обратного рассеяния для анализа поверхностных слоев полимерных соединений
- Прогноз доз облучения органов человека от циклотронного радиофармацевтического (РФП) “Астат-211” при внутривенном введении.

Основные полученные результаты второго этапа НИР:

1. Предложен новый динамический подход к вычислениям средних спинов осколков вынужденного деления в реакциях с тяжелыми ионами, который апробирован на примере описания экспериментальных данных по угловой и энергетической зависимостям средних спинов, а также по анизотропии угловых распределений осколков деления для реакции полного слияния-деления $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ при $E_{\text{cm}} = (55 - 150) \text{ МэВ}$.
2. Динамическая теория вынужденного деления тяжелых ядер обобщена на случай распада составного ядра образующегося при полном слиянии деформированных ядер, обладающих спином. Предложенное обобщение включает строгие квантовомеханические вычисления начальных распределения по компонентам углового момента сформированного составного ядра, которые адаптированы для расчетов распределений по величине проекции углового момента на ось деления.
3. В экспериментах по изучению интерференционных эффектов в выходах тормозного излучения, сопровождающего α -распад тяжелых ядер, предложено использовать германиевый детектор большого объема в сочетании с быстрыми временными оцифровщиками сигналов, что позволяет при проведении вейвлет-обработки сигналов с детекторов достичь временного разрешения $\sim 30 \text{ нс}$ при объеме детектора не менее 100 см^3 . Данная методика использована в эксперименте по измерению вероятностей испускания γ -квантов из возбужденных состояний дочерних ядер, образующихся в цепочке α -распада ядра ^{226}Ra .
4. Метод ядерного обратного рассеяния показал наличие переходных слоев толщиной более 5 мкм в структуре теплозащитных покрытий между подложкой и основным слоем. Определена их общая пористость.
5. В результате биологических испытаний получены новые данные по фармакокинетике циклотронного препарата Астат-211 для двух случаев: обычной и без йодной диеты. Полученные результаты и данные клинической практики применения РФП с ^{131}I свидетельствуют о возможности существенного уменьшения необходимой терапевтической активности РФП “Астат-211”.
6. Впервые квантовомеханическая задача трех и более тел применена к внутри кластерному взаимодействию для кластеров, состоящих из трех и более молекул. Практическое применение ожидается в области медицинских исследований.

Содержание

Определения, обозначения и сокращения

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями, сокращениями:

вейвлет-обработка - анализ в базисе вейвлет-функций;

МДО – Микродуговое оксидирование, электрохимический процесс модификации в электролитной плазме с целью получения оксидных слоев (покрытий)

ДОП — дисперсионный оптический потенциал,

ДОМ — дисперсионная оптическая модель,

РФП — радиофармпрепарат,

ARC - Amplitude and Rise time Compensated,

CF-метод - Constant-Fraction метод,

ВУФ - вакуумный ультрафиолет,

ЯОР - ядерное обратное рассеяние,

ТГц — терагерц,

Введение

Изучение механизмов ядерных реакций при низких и средних энергиях является одной из наиболее активно развивающихся областей современной теоретической и экспериментальной ядерной физики. Во многом это связано с возможностью получения новой информации о свойствах ядерной материи. Кроме того, исследования по физике ядерных реакций позволяют получить уникальные данные о структурных особенностях атомных ядер, включая сверхтяжелые ядра, ядра вблизи границ нуклонной стабильности, а также о свойствах разнообразных промежуточных ядерных систем, образующихся в ходе развития ядерных реакций при больших значениях деформации, энергии возбуждения и углового момента. Следует отметить важную роль физики ядерных реакций в решении целого ряда прикладных задач в области ядерной энергетики, материаловедения и ядерной медицины.

Цель НИР: развитие новых теоретических подходов к изучению механизмов ядерных реакций при низких и средних энергиях, а также новых подходов к решению прикладных задач, включая анализ свойств новых материалов и ядерную медицину.

План работ второго этапа НИР был следующим:

- Исследование роли входного канала реакций с тяжелыми ионами на механизмы их протекания.
- Исследование эволюции нейтронной одночастичной структуры ядер в направлении границ нуклонной стабильности
- Развитие метода спектрометрии ядерного обратного рассеяния для анализа поверхностных слоев полимерных соединений
- Прогноз доз внутреннего облучения человека от циклотронного РФП “Астат-211” при внутривенном введении.

Основные полученные результаты второго этапа НИР:

- Динамическая теория вынужденного деления тяжелых ядер, включающая строгие квантовомеханические вычисления начальных распределения по компонентам углового момента составного ядра.
- Новый динамический подход к описанию процесса формирования спинов осколков вынужденного деления для реакций с тяжелыми ионами.
- Определение дисперсионного оптического потенциала изотопов Ag. Расчет дифференциальных сечений упругого рассеяния и полных сечений взаимодействия

системы $n+^{107}\text{Ag}$ и эволюции нейтронного одночастичного спектра изотопов Ag в направлении границ нуклонной стабильности по дисперсионной оптической модели.

- Результаты элементного послойного анализа полиамидных соединений, МДО - покрытий и водородсодержащих материалов, повышение точности определения пористости анализируемых покрытий. Разработанная методика применена для анализа процессов формирования диоксидциркониевых покрытий на изделиях аэрокосмической отрасли.
- Оценка необходимой терапевтической активности РФП “Астат-211” для внутривенного введения с использованием данных клинической практики применения РФП с I-131.

Основная часть

Динамическая теория вынужденного деления тяжелых ядер обобщена на случай реакций полного слияния-деления, реализующихся при столкновении деформированных ядер, обладающих спином. Предложенное обобщение включает строгие квантовомеханические вычисления начальных распределений по компонентам углового момента сформированного составного ядра, которые адаптированы для расчетов распределений по величине проекции углового момента на ось деления. В рамках предложенного обобщения и на примере реакций $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{12}\text{C} + ^{235,236,238}\text{U}$, $^{13}\text{C} + ^{235}\text{U}$ в широкой области энергий столкновения, включающей и подбарьерные энергии, исследовано влияние условий, реализующихся во входных каналах реакций, на вид угловых распределений осколков и временную шкалу процесса деления. Проведенный анализ продемонстрировал: 1) в случае распада тяжелых высоковозбужденных составных ядер существенную роль играют эффекты памяти о входном канале реакции; 2) предложенное обобщение является хорошим теоретическим инструментом для изучения динамики процесса полного слияния-деления в реакциях с тяжелыми ионами [1]

Развит новый динамический подход к вычислениям средних спинов осколков вынужденного деления. Подход базируется на формализме предложенной ранее динамической модели процесса формирования угловых распределений осколков деления. В рамках предложенного подхода проведен анализ экспериментальных данных по угловой и энергетической зависимостям средних спинов, а также по анизотропии угловых распределений осколков деления для реакции полного слияния-деления $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ при $E_{\text{cm}} = (55 - 150)$ МэВ. Показано, что в целом расчеты обеспечивают удовлетворительное описание рассматриваемых экспериментальных данных, а время релаксации для К-моды составляет по порядку величины 10^{-20} с. (Приняты в печать: Вестник МГУ. Серия 3. Физика и Астрономия. 2017. № 1; Известия РАН. Серия физическая. 2017).

При энергиях возбуждения соответствующих нуклонным резонансам измерена двойная спиновая асимметрия. Эта асимметрия наблюдалась во взаимодействии продольно поляризованных электронов с энергиями 1.1, 1.3, 2.0, 2.3 и 3.0 ГэВ на продольно поляризованной мишени NH_3 . Получена новая экспериментальная информация об асимметрии в реакции $e p - e p^+(n)$ при низких переданных импульсах, $Q^2 = (0.0065 - 0.35)$ GeV/c², которая позволит более точно определить спиновую структурную функцию нуклона. [9]

Выполнен расчет эволюции нейтронного одночастичного спектра изотопов Ag в направлении границы нейтронной стабильности и распределения заряда и материи в изотопах Pb, Ca, Ni, Mo в модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом. Для этого сконструирован нейтронный дисперсионный оптический потенциал (ДОП) для изотопов Ag в широком диапазоне изменения числа N . Развитый ранее способ конструирования ДОП позволил описать новые экспериментальные данные о нейтронных одночастичных энергиях изотопов $^{107,109}\text{Ag}$ в пределах экспериментальных погрешностей без каких-либо подгоняемых параметров. Этот результат подтверждает применимость дисперсионной оптической модели (ДОМ) для расчета одночастичных

характеристик ядер с незамкнутыми подоболочками. С ДОП удалось также описать имеющиеся данные по рассеянию нейтронов в диапазоне энергий $1 < E < 15$ МэВ (дифференциальные сечения упругого рассеяния и полные сечения взаимодействия) изотопом ^{107}Ag с качеством, близким к традиционной оптической модели с локальными параметрами современной систематики. Проведена физически обоснованная экстраполяция ДОП на область нестабильных изотопов Ag вплоть до границы нейтронной стабильности. С этими параметрами проведен расчет эволюции нейтронных одночастичных спектров изотопов Ag в широком диапазоне изменения числа N . Расчетные одночастичные спектры демонстрируют формирование частично-дырочных щелей, соответствующих традиционным магическим числам $N = 50, 82$. Исследована эволюция полученных в настоящей работе и вычисленных ранее одночастичных энергий изотопов с $N = 56$ ^{103}Ag , ^{94}Sr , ^{96}Zr , ^{98}Mo , ^{104}Cd , ^{106}Sn . Эволюция демонстрирует исчезновение замыкания подоболочки $2d_{5/2}$ при переходе от ^{96}Zr к ^{106}Sn за счет быстрого углубления уровня $1g_{7/2}$. Это состояние входит в изотопах олова в состав псевдоспинового дублета $2d_{5/2}-1g_{7/2}$, ответственного за формирование слабого магического числа $N = 64$ в изотопе ^{114}Sn .

Проведен расчет распределений плотности ядерного вещества для стабильных изотопов Ca, Ni, Mo в рамках одночастичного подхода с найденными ранее параметрами дисперсионной оптической модели. Достигнуто соответствие с экспериментальными данными о зарядовых распределениях и rms (*root mean square*)- радиусах. Расчет демонстрирует возможности ДОМ для описания и предсказания распределений плотности ядер.[2,3,4,5]

В экспериментах по изучению интерференционных эффектов в выходах тормозного излучения, сопровождающего α - распад тяжелых ядер, предложено использовать германиевый детектор большого объема в сочетании с быстрыми временными оцифровщиками сигналов, что позволяет при проведении вейвлет-обработки сигналов с детекторов достичь временного разрешения ~ 30 нс при объеме детектора не менее 100 см^3 . Данная методика использована в эксперименте по измерению вероятностей испускания γ - квантов из возбужденных состояний дочерних ядер, образующихся в цепочке α - распада ядра ^{226}Ra .

В выполненных экспериментах по регистрации тормозных фотонов с целью увеличения чувствительности методики использовался детектор из сверхчистого германия. Апробация методики выполнена в эксперименте по регистрации γ -квантов, испускаемых из возбужденных состояний дочерних ядер, образующихся в цепочке α - распада ^{226}Ra .

Следует заметить, что вследствие разброса во временах сбора носителей зарядов и их конечных скоростей дрейфа в объеме кристалла, временное разрешение Ge- детекторов в зависимости от их конструктивных особенностей составляет от 50 нс (для тонких планарных детекторов) до 600 нс (для коаксиальных детекторов большого объема). Одним из путей уменьшения временного разброса является сегментирование детектора, что ведет к существенному усложнению производства как самого детектора, так и сопутствующей ему электронной аппаратуры. Другим путем является использование быстрых временных оцифровщиков с последующей вейвлет-обработкой формы приходящих с детекторов сигналов.

В эксперименте регистрировались α - частицы и γ - кванты, образующиеся в цепочке распада ^{226}Ra . Исходя из данных по вероятностям распада на возбужденные состояния дочерних ядер и вероятностям снятия возбуждений путем испускания γ -квантов, наиболее интенсивным γ - переходам соответствуют α - распады изотопов ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{214}Po на первые возбужденные состояния ядер ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{210}Pb с последующим снятием возбуждения путем E2-переходов с испусканием γ - квантов с энергиями 186.1, 510 и 799.7 кэВ, соответственно.

Для уменьшения временного разброса методики совпадений при использовании несегментированного Ge- детектора большого объема мы использовали цифровой осциллограф Tektronix TDS 7704B в сочетании с ARC подходом к временной привязке gamma- сигналов и вейвлет-обработкой их формы.

Следует отметить, что по сравнению с коммерческими модульными оцифровщиками быстрые цифровые осциллографы имеют преимущество во временном разрешении, так как были специально разработаны для прецизионных измерений сверхчастотных сигналов. Так, полоса пропускания у цифрового осциллографа Tektronix TDS 7704B равна 7 ГГц, а скорость оцифровки достигает 20×10^9 выборка/с при восьмибитном АЦП.

Одним из факторов, определяющих временную неопределенность, является зашумленность сигнала. Поэтому вначале импульсы с gamma- и alpha- детекторов обрабатывались вейвлет-преобразованием Хаара на глубину до 4-го уровня.

Для сигналов с alpha- детектора использовался алгоритм временной привязки со следящим порогом (CF- метод, constant - fraction method), когда временная метка ставится на фронте импульса на высоте, равной определенной доле амплитуды, когда крутизна фронта максимальна. CF- метод позволяет практически полностью избавиться от амплитудной зависимости временной привязки и является наиболее удобным цифровым методом для обработки импульсов. Порог устанавливался на высоте $f = 1/3$ от амплитуды импульса. Для анализа сигнала с gamma- детектора использовался ARC- метод, который является разновидностью CF- метода, когда время задержки инвертированного сигнала превышает значение пропорциональное произведению длительности фронта сигнала и величины выбранного порога.

Общее число зарегистрированных alpha - gamma совпадений за время набора ~ 400 часов оказалось равным $\sim 10^5$. Временное разрешение методики совпадений τ составило ~ 150 нс и 30 нс соответственно.

Представлены данные по использованию быстрых временных осциллографов в экспериментах по регистрации gamma - gamma совпадений от источника ^{60}Co . В качестве стартового сигнала использовался сигнал от быстрого пластикового сцинтилляционного детектора, в качестве стопового сигнала – сигнал от Ge- детектора большого объема, CdTe- детектора и сцинтилляционных детекторов на основе BGO и NaJ(Tl). Показано, что наименьшим значением параметра энергетического разрешения $E_{x \text{ tau}}$, влияющим на отношение числа истинных совпадений к числу случайных, обладают полупроводниковые детекторы gamma- излучения.

Результаты работы опубликованы в журнале Известия РАН. Серия физическая, том 80, № 5, с. 640-643 и в сборнике тезисов докладов 66-ой международной конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро 2016» г. Саров.[12, 13, 14, 15, 16]

В рамках совместной работы с НИУ «МАИ» и ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» с применением метода спектрометрии ядерного обратного рассеяния (ЯОР), проведены исследования теплозащитных покрытий на основе оксида гафния на изделиях аэрокосмической отрасли. В настоящее время особый интерес направлен на уменьшение теплопроводности теплозащитного покрытия, поскольку это позволит увеличить его рабочую температуру и уменьшить толщину. Замечено, что покрытия на основе оксида гафния менее подвержены спеканию и обладают более длительной выдержкой при термоциклических испытаниях, что делает их перспективными в качестве термобарьерных слоев теплозащитных покрытий. Научной группой проводились исследования однослойных покрытий из оксида гафния и двухслойных покрытий с промежуточным слоем никеля общей толщиной до 70 мкм, полученные методом плазменного напыления сверхзвуковой струей в разреженной атмосфере. Покрытия исследовали с помощью методов ядерного обратного рассеяния протонов энергии 7,6 МэВ, растровой электронной микроскопии рентгеновской дифракции. Покрытия формируются из деформированных частиц размером более 20 мкм, на поверхности и на

стыках которых расположены слои и конгломераты наночастиц размером $0,03 \div 0,04$ мкм. Метод ядерного обратного рассеяния показал наличие в структуре покрытий переходных слоев толщиной более 5 мкм между подложкой и основным слоем теплозащитного покрытия, а также позволил определить их общую пористость. Результаты исследований были доложены на V Международной конференции "Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей" и на 46 международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами.

Также проводились исследования закономерностей применения спектрометрии ядерного обратного рассеяния при анализе пористых неоднородных структур. Известно, что неоднородность мишени по плотности может приводить к размытию резонансных пиков в спектрах обратного рассеяния из-за увеличения величины энергетического страгглинга.

Рисунок (см Приложение 1) демонстрирует данный эффект для спектров ядерного обратного рассеяния (ЯОР) протонов энергии 7.5 МэВ, измеренных для двух магниевых мишеней - порошковой мишени и монолитного магния. Также проводились исследования для покрытий из диоксида циркония, сформированных плазменным нанесением и микродуговым оксидированием. Было показано, что в случае упорядоченных структур эффект не наблюдается. В будущем возможность учета дисперсности и использования ее проявления повысит точность анализа дисперсных и композиционных материалов методом спектрометрии ядерного обратного рассеяния. Результаты исследований были доложены на XLVI международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами.[6,7,8]

Исследована фармакокинетика циклотронного РФП "Астат-211" на самцах крыс SD (Sprague Dawley) при однократном введении при обычной и без йодной диетах. В исследовании было использовано 12 групп самцов крыс SD (Sprague Dawley). В каждой группе было 6 крыс. Тестируемый препарат вводили животным внутривенно в хвостовую вену однократно, в объеме 10 мл/кг, в дозе - 100 мКи/животное. Обнаружено, что поглощение At-211 щитовидной железой самцами крыс, находившихся на без йодной диете, больше, чем у крыс, находившихся на обычном питании. [20]

Предложен и теоретически проанализирован метод угловой развертки импульсов фотоэлектронов, возникающих при облучении атомов фемтосекундными импульсами в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) и мягкого рентгена, с помощью циркулярно поляризованного терагерцевого (ТГц) излучения. Показано, что при длительности импульсов менее периода ТГц излучения осуществляется угловая развертка импульса электронов, по которой можно судить о длительности и форме ВУФ импульса. При большей длительности ВУФ импульса возникают интерференционные эффекты, проводящие к образованию временной каустики - характерной яркой области в спектре электронов. При длительности импульса много более периода ТГц излучения возникают боковые линии в спектре.

Проведен теоретический анализ эксперимента, в котором атомы облучались синхронными импульсами ВУФ и инфракрасного линейно поляризованного излучения. Исследовалась зависимость спектра фотоэлектронов от угла между направлениями поляризации обоих пучков. Анализ проведен на основе развитой ранее теории взаимодействия атомов с двцветными импульсами. Результаты анализа хорошо согласуются с экспериментом. [17, 18, 19]

Развит метод определения индуцированных дипольных моментов в многомолекулярном нанокластере в предположении, что одна из молекул имеет дипольный момент, остальные неполярные. Для индуцированных дипольных моментов молекул получены аналитические выражения, с учётом взаимной индукции молекул. Для конкретных нанокластеров были проведены численные расчёты величин индуцированных дипольных моментов. Проведено исследование энергии взаимодействия трёх молекул, образующих нанокластер в предположении, что одна из молекул имеет дипольный

момент, остальные неполярные. Получены аналитические выражения для дисперсионных и индукционных энергий молекул с учётом взаимной индукции и кулоновского отталкивания на малых расстояниях. Для конкретных нанокластеров были проведены численные расчёты. [10, 11]

Заключение

- 1) Предложено обобщение динамической теории вынужденного деления тяжелых ядер, включающее строгие квантовомеханические вычисления начальных распределения по компонентам углового момента составного ядра.
- 2) Предложен новый динамический подход к описанию процесса формирования спинов осколков вынужденного деления для реакций с тяжелыми ионами.
- 3) Выполнен предсказательный расчет эволюции нейтронного одночастичного спектра изотопов Ag в направлении границы нейтронной стабильности и распределения заряда и материи в изотопах Pb, Ca, Ni, Mo в модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом.
- 4) В экспериментах по изучению интерференционных эффектов в выходах тормозного излучения, сопровождающего α -распад тяжелых ядер, предложено использовать германиевый детектор большого объема в сочетании с быстрыми временными оцифровщиками сигналов, что позволяет при проведении вейвлет-обработки сигналов с детекторов достичь временного разрешения ~ 30 нс при объеме детектора не менее 100 см^3 . Данная методика использована в эксперименте по измерению вероятностей испускания γ -квантов из возбужденных состояний дочерних ядер, образующихся в цепочке α -распада ядра ^{226}Ra .
- 5) Метод ядерного обратного рассеяния показал наличие в структуре покрытий переходных слоев толщиной более 5 мкм между подложкой и основным слоем теплозащитного покрытия, а также позволил определить их общую пористость
- 6) Методом ядерного обратного рассеяния обнаружено наличие переходных слоев толщиной более 5 мкм в структуре теплозащитных покрытий между подложкой и основным слоем. Определена их общая пористость.
- 7) В результате биологических испытаний получены новые данные по фармакокинетике циклотронного препарата “Астат-211” для двух случаев: обычной и без йодной диеты. Сопоставление полученных результатов и данных клинической практики применения РФП с I-131 свидетельствуют о возможности существенного уменьшения необходимой терапевтической активности РФП “Астат-211”.
- 8) Впервые квантовомеханическая задача трех и более тел применена к внутри кластерному взаимодействию для кластеров, состоящих из трех и более молекул. Практическое применение ожидается в области медицинских исследований.

Список использованных источников

- 1) Dynamic approach to description of entrance channel effects in angular distributions of fission fragments Eremenko D.O., Drozdov V.A., Fotina O.V., Platonov S.Yu, Yuminov O.A. в журнале *Physical Review C - Nuclear Physics*, издательство *American Physical Society (United States)*, том 94, № 1, с. 014602-1-014602-9 (2016)
- 2) Evolution of N=40 Neutron Subshell at $20 \leq Z \leq 30$ within the Dispersive Optical Model Bepalova O.V., Ermakova T.A., Klimochkina A.A., Spasskaya T.I. в журнале *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 79, № 4, с. 581-585 (2016)
- 3) NEUTRON SINGLE-PARTICLE STRUCTURE OF Mo ISOTOPES WITHIN THE DISPERSIVE OPTICAL MODEL Bepalova O.V., Klimochkina A.A., Spasskaya T.I. в журна-

ле *Physics of Atomic Nuclei*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 79, № 4, с. 586-593 (2016)

4) НЕЙТРОННАЯ ОДНОЧАСТИЧНАЯ СТРУКТУРА ИЗОТОПОВ Мо В ДИСПЕРСИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ Беспалова О.В., Климочкина А.А., Спасская Т.И. в журнале *Ядерная физика (Physics of Atomic Nuclei)* Издательство "Наука-Интерпериодика", том 79, № 4, с. 385-392 (2016)

5) ЭВОЛЮЦИЯ НЕЙТРОННОЙ ПОДОБОЛОЧКИ $N = 40$ В ЯДРАХ С $20 \leq Z \leq 30$ В ДИСПЕРСИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ Беспалова О.В., Ермакова Т.А., Климочкина А.А., Спасская Т.И. в журнале *Ядерная физика (Physics of Atomic Nuclei)* Издательство "Наука-Интерпериодика", том 79, № 4, с. 380-384 (2016)

6) Исследование покрытий на основе оксида гафния с использованием спектрометрии ядерного обратного рассеяния (Устный) Авторы: Борисов А.М., Полянский М.Н., Савушкина С.В., Ткаченко Н.В., Востриков В.Г., Каменских А.И. XLVI международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, Россия, 31 мая - 2 июня 2016

7) Спектрометрия ядерного обратного рассеяния дисперсных материалов (Устный) Авторы: Борисов А.М., Востриков В.Г., Каменских А.И., Ткаченко Н.В. XLVI международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, Россия, 31 мая - 2 июня 2016

8) STABILIZATION OF HIGH-TEMPERATURE ZIRCONIA PHASES IN PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION COATINGS (Устный) Авторы: ASHMARIN A.A., APELFELD ANDREY, BETSOFFEN S.YA, BORISOV A.M., VLADIMIROV BORIS, VOSTRIKOV V.G., TKACHENKO N.V., SAVUSHKINA SVETLANA V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ", Россия, 16-20 мая 2016

9) Measurement of target and double-spin asymmetries for the $e^-p^+ \rightarrow e\pi^+(n)$ reaction in the nucleon resonance region at low Q^2 Drozdov V.A., Fedotov G., Golovatch E., Ishkhanov B.S., Isupov E.L., Moiseev V.I., CLAS C. в журнале *Physical Review C - Nuclear Physics*, издательство *American Physical Society (United States)*, том 94, № 4 (2016)

10) The interaction energy of three molecules united in a nanocluster by long-range attraction forces with account for Coulomb repulsion Komarov V.V., Popova A.M., Schmidt L., Jungclas H. в журнале *MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN*, том 71, № 5, с. 476-481 (2016)

11) Энергия взаимодействия трёх молекул, объединённых в нанокластер дальнедействующими силами притяжения с учётом кулоновского отталкивания Комаров В.В., Попова А.М., Шмидт Л., Юнгклас Х. в журнале *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, издательство *Изд-во Моск. ун-та (М.)*, № 5, с. 14-20 (2016)

12) Using fast digital converters to detect bremsstrahlung radiation during the alpha decay of heavy nuclei Eremin N.V., Paskhalov A.A. в журнале *Bulletin of the Russian Academy of Science, Physics*, том 80, № 5, с. 579-582 (2016)

13) К вопросу о регистрации тормозного излучения при альфа-распаде тяжелых ядер с помощью быстрых цифровых преобразователей Еремин Н.В., Пасхалов А.А. в журнале *Известия РАН. Серия физическая*, том 80, № 5, с. 640-643

14) Выделение редких ядерных превращений из фонового излучения методом временных рядов (Стендовый) Авторы: Еремин Н.В., Пасхалов А.А. 66-я международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро 2016». 11 – 14 октября 2016 г., Саров, Россия., г. Саров, Россия, 11-14 октября 2016

15) Использование быстрых временных осциллографов в совпадательных экспериментах с полупроводниковыми детекторами (Стендовый) Авторы: Пасхалов А.А., Еремин Н.В. 66-я международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и

структуре атомного ядра «Ядро 2016». 11 – 14 октября 2016 г., Саров, Россия., г. Саров, Россия, 11-14 октября 2016

16) Нахождение параметров сигналов с детекторов ядерного излучения, зарегистрированных быстрым цифровым осциллографом, методом вейвлет преобразования (Стендовый) Авторы: Еремин Н.В., Пасхалов А.А 66-я международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро 2016». 11 – 14 октября 2016 г., Саров, Россия., г. Саров, Россия, 11-14 октября 2016

17) Angle resolved photoelectron spectroscopy of two-color XUV–NIR ionization with polarization control Dusterer S., Hartmann G., Babies F., Beckmann A., Brenner G., Buck J., Costello J., Dammann L., De Fanis A., Bler P.Ge, Glaser L., Ilchen M., Johnsson P., Kazansky A.K., Kelly T.J., Mazza T., Meyer M., Nosik V.L., Sazhina I.P., Scholz F., Seltmann J., Sotoudi H., Viefhaus J., Kabachnik N.M. в журнале *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, издательство *Institute of Physics Publishing (United Kingdom)*, том 49, с. 165003-1-165003-8 (2016)

18) Interference effects in angular streaking with a rotating terahertz field Kazansky A.K., Bozhevolnov A.V., Sazhina I.P., Kabachnik N.M. в журнале *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, издательство *American Physical Society (United States)*, том 93, № 1, с. 013407-1-013407-5 (2016)

19) Патенты 2016 СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА "АСТАТ-211" Авторы: Юминов Олег Аркадьевич, Дроздов Вадим Александрович, Еременко Дмитрий Олегович, Платонов Сергей Юрьевич, Фотина Ольга Владиленовна #2593017, 27 июля