

МГУ имени М.В. Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.
Скобельцына

№ госрегистрации
115041510015

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК
539.142 Модели ядер
539.141 Ядерные силы

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Ядерная физика
по теме:

Фундаментальные и прикладные проблемы физики ядерных реакций
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Еременко Д.О.

«__» _____ Г.

Юминов О.А.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

заведующий отделом, доктор _____ (Еременко Д.О.)

физико-математических наук,
доцент/с.н.с. по специальности

ведущий научный со- _____ (Юминов О.А.)

трудник, доктор физико-
математических наук, про-
фессор по специальности

Исполнители темы:

старший научный со- _____ (Беспалова О.В.)

трудник, доктор физико-
математических наук, до-
цент/с.н.с. по специальности

старший научный сотру- _____ (Галанина Л.И.)

дник, кандидат физико-
математических наук

профессор, доктор физико- _____ (Гончаров С.А.)

математических наук, до-
цент/с.н.с. по специальности

старший научный сотру- _____ (Дроздов В.А.)

дник, кандидат физико-
математических наук

главный научный со- _____ (Зеленская Н.С.)

трудник, доктор физико-
математических наук, про-
фессор по специальности

научный сотрудник _____ (Климочкина А.А.)

ведущий научный со- _____ (Комаров В.В.)

трудник, доктор физико-
математических наук, про-
фессор по специальности

ведущий научный со- _____ (Лебедев В.М.)

трудник, доктор физико-
математических наук, до-
цент/с.н.с. по специальности

ведущий научный со- _____ (Платонов С.Ю.)

трудник, доктор физико-
математических наук, доцент
по кафедре

ведущий научный со- _____ (Попова А.М.)

трудник, доктор физико-
математических наук, про-
фессор по специальности

научный сотрудник
научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук
ведущий специалист
старший научный сотруд-
ник, кандидат физико-
математических наук, до-
цент/с.н.с. по специальности
младший научный сотрудник,
кандидат технических наук
ведущий специалист , канди-
дат физико-математических
наук, доцент/с.н.с. по специ-
альности

_____ (Приселкова А.Б.)
_____ (Сажина И.П.)
_____ (Спасская Т.И.)
_____ (Спасский А.В.)
_____ (Ткаченко Н.В.)
_____ (Фотина О.В.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

гипомагнитные и радиационные условия, ядерные реакции, механизмы ядерной реакции, деление, оптическая модель, радиофармпрепараты, дозы облучения, время жизни ядра

Ключевые слова по-английски:

nuclear reaction mechanisms, hypomagnetic and radiation conditions, fission, nuclear reactions, optical model, nucleus lifetime, radiation dose, radiopharmaceuticals

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.

Содержание.

Реферат — стр 4

Введение — стр 8

Основная часть — стр 11

Заключение — стр 14

Приложение А — Таблица 16,

Приложение В — pdf файл с иллюстрациями,

Приложение С — pdf файл с версией отчёта

Основные задачи седьмого этапа НИР.

В рамках продолжения исследований фундаментальных проблем физики ядерных реакций предполагалось проведение следующих работ:

- Исследование структуры ядер, удаленных от линии бета-стабильности в возбужденных состояниях, обладающих экзотическими свойствами (высокой степенью кластеризации, гало-структурой).
- Исследование зависимости диффузности поверхности близких к сферическим ядер от избытка нейтронов (протонов). Такая зависимость важна для предсказаний свойств нестабильных ядер со значительной нейтрон-протонной асимметрией.
- Продолжить исследование прямых реакций на легких ядрах с возбуждением экзотических состояний.
- Исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер

- Проведение теоретического анализа новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям реакции $^{11}\text{B}(^3\text{He}, d)^{12}\text{C}$ и реакции α -частиц на ^{13}C при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояния 11.08 МэВ. Целью анализа является информация о свойствах ядер $^{12,13}\text{C}$ (спинах, четностях, средне-квадратичных радиусах, структуре волновых функций) в возбужденных состояниях в широкой области энергий возбуждения.

В рамках продолжения исследований прикладных задач физики ядерных реакций предполагалось проведение следующих работ:

- Продолжить исследования в рамках «Договора о научно-методическом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ГНЦ РФ – ИМБП РАН», связанные с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.
- Расширение аналитических способностей метода ядерного обратного рассеяния при анализе изделий, эксплуатируемых при высоких нагрузках или в агрессивных средах.
- Продолжить исследования фотоядерных реакций с целью выделения радионуклидов медицинского назначения.

Основные полученные результаты седьмого этапа НИР.

В области исследований фундаментальных проблем физики ядерных реакций были решены следующие задачи:

- Обнаружено гигантское нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности — Показано, что нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности образуется, когда нейтроны занимают состояния с низким **I**: $4s_{1/2}$, $3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$. Рассчитанные среднеквадратичные радиусы этих состояний находятся в интервале от 10 до 12 фм. Распределение плотности нейтронов изотопа ^{198}Ce с $N = 140$ демонстрирует длинный хвост, который можно отнести к гигантскому гало.
- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер:
 - а) Выполнен анализ измеренных при энергии α -частиц 30.3 МэВ угловых распределений дифференциального сечения реакции $^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{31}\text{P}$ с образованием конечного ядра в основном ($1/2^+$), первом ($3/2^+$; 1.265 МэВ) и втором ($5/2^+$; 2.232 МэВ) возбужденных состояниях. Показано, что экспериментальные результаты удовлетворительно описываются в предположении механизма срыва протонного кластера. Для перехода на уровень $5/2^+$ возможен вклад механизма образования составного ядра в области больших углов вылета протонов.
 - б) Продолжен теоретический анализ угловых зависимостей дифференциального сечения реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$ с образованием конечного ядра в основном (0^+) и первом возбужденном (2^+ ; 2.235) МэВ состояниях. Показано, что при последовательном уменьшении энергии α -частиц от

30.3 МэВ до 13 МэВ вклад механизма срыва тритонного кластера, являющийся в этой реакции определяющим при $E_\alpha = 30$ МэВ, постепенно уменьшается, и при $E_\alpha = 13$ МэВ основным становится механизм образования составного ядра.

с) Рассчитаны спектроскопические амплитуды отделения нейтронов в ядре $^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$, необходимые для определения нейтронной периферии в различных состояниях ^{14}C в предположении механизмов передачи динейтронного кластера и независимой передачи нейтронов в реакции $^{12}\text{C}(t, p)^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$.

d) Продолжены работы в рамках «Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН» по исследованию в области структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ и показано, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения «развальшой» частицы от энергии квазисвязанного синглетного pp -состояния.

- Проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям реакции $^{11}\text{B}({}^3\text{He}, d)^{12}\text{C}$. Исследовались переходы в основное и в восемь возбужденных состояний ядра ^{12}C при энергиях возбуждения 4.44, 7.65, 9.64, 13.35, 16.57, 20.98, 21.6 и 22,4 МэВ. Впервые определена возможная спин-четность 3^- и изоспин $T = 0$ для состояния 20,98 МэВ. Дополнительно проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{12}C при 110 МэВ с возбуждением состояния 13.35 МэВ, который, совместно с анализом реакции срыва и оценкой средне-квадратичного радиуса, дал аргументы для назначения спин-четности 4^- и изоспина $T = 0$ для состояния 13.35 МэВ.
- Выполнен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{13}C при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояния 11,08 МэВ, что позволило оценить средне-квадратичный радиус этого состояния.
- В составе коллаборации *CLAS* изучена спиновая зависимость сечений рассеяния электронов на протонах при малых переданных импульсах ($0.012 \text{ ГэВ}^2 \leq Q^2 \leq 1.0 \text{ ГэВ}^2$).

В области исследований прикладных вопросов физики ядерных реакций были решены следующие задачи:

- Выполнены работы в рамках «Договора о научно-методическом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ГНЦ РФ-ИМБП РАН», связанные с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов. Получены новые данные о влиянии гипомагнитных условий на развитие эмбрионов и следующих поколений японского перепела, а также на хромосомные нарушения семян салата, облученных быстрыми нейтронами.

- Получены новые результаты гистологических исследований кроветворных органов, печени и селезенки разновозрастных эмбрионов японского перепела, развитие которых проходило в условиях ослабленного магнитного поля Земли в 1000 раз в двух последовательных поколениях. Показано, что развитие зародышей птиц в гипомагнитных условиях оказывает влияние не только на эмбрионы и организмы, образовавшиеся из этих эмбрионов, но также в значительной степени на последующие поколения, вплоть до гибели всей популяции.
- На основе спектрометрии ядерного обратного рассеяния разработана методика определения неоднородности по плотности поверхностного слоя конструкционных и функциональных материалов, позволяющая проводить оценку устойчивости защитных покрытий во время коррозионных и тепловых испытаний, а также определять степень гомогенности порошковых материалов.
- Выполнен анализ и разработана теория *PCI* эффекта взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов с вакансией во внутренней оболочке. В отличие от известных теорий *PCI* эффектов, предложенный подход описывает временную зависимость этих эффектов. Конкретные расчёты проведены для Оже-распада атома криптона.
- Исследованы выходы фотоядерных реакций, протекающих при облучении иттербия естественного изотопного состава тормозными фотонами энергией до 55 МэВ. Показана возможность наработки и радиохимического выделения перспективного для медицины радионуклида ${}_{167}\text{Tm}^{69}$.

Определения, обозначения и сокращения.

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

ДОП — дисперсионный оптический потенциал,

ДОМ — дисперсионная оптическая модель,

РФП — радиофармпрепарат,

ЯОР - ядерное обратное рассеяние,

PCI - взаимодействие в конечном состоянии (post-collision interaction)

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 седьмого этапа НИР был следующим:

- Исследование структуры ядер, удаленных от границы бета-стабильности в возбужденных состояниях, обладающих экзотическими свойствами (высокой степенью кластеризации, гало-структурой).
- Исследование зависимости диффузности поверхности близких к сферическим ядер от избытка нейтронов (протонов). Такая зависимость важна для предсказаний свойств нестабильных ядер со значительной нейтрон-протонной асимметрией.
- Продолжить исследование прямых реакций на легких ядрах с возбуждением экзотических состояний.
- Исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер
- Проведение теоретического анализа новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям реакции неупругого рассеяния α -частиц и ${}^3\text{He}$. Целью анализа является информация о свойствах ядер ${}^{12,13}\text{C}$ (спинах, четностях, средне-квадратичных радиусах, структуре волновых функций) в возбужденных состояниях в широкой области энергий возбуждения.
- Продолжить исследования связанные с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.
- Расширение аналитических способностей метода ядерного обратного рассеяния при анализе изделий, эксплуатируемых при высоких нагрузках или в агрессивных средах.
- Продолжить исследования фотоядерных реакций с целью выделения радионуклидов медицинского назначения.

Основные полученные результаты седьмого этапа НИР:

- Обнаружено гигантское нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности — Показано, что нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности образуется, когда нейтроны занимают состояния с низким l : $4s_{1/2}$, $3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$. Рассчитанные среднеквадратичные радиусы этих состояний находятся в интервале от 10 до 12 фм. Распределение плотности нейтронов изотопа ^{198}Ce с $N = 140$ демонстрирует длинный хвост, который можно отнести к гигантскому гало.
- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер:
 - а) Выполнен анализ измеренных при энергии α -частиц 30.3 МэВ угловых распределений дифференциального сечения реакции $^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{31}\text{P}$ с образованием конечного ядра в основном ($1/2^+$), первом ($3/2^+$; 1.265 МэВ) и втором ($5/2^+$; 2.232 МэВ) возбужденных состояниях. Показано, что экспериментальные результаты удовлетворительно описываются в предположении механизма срыва протонного кластера. Для перехода на уровень $5/2^+$ возможен вклад механизма образования составного ядра в области больших углов вылета протонов.
 - б) Продолжен теоретический анализ угловых зависимостей дифференциального сечения реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$ с образованием конечного ядра в основном (0^+) и первом возбужденном (2^+ ; 2.235) МэВ состояниях. Показано, что при последовательном уменьшении энергии α -частиц от 30.3 МэВ до 13 МэВ вклад механизма срыва тритонного кластера, являющийся в этой реакции определяющим при $E_\alpha = 30$ МэВ, постепенно уменьшается, и при $E_\alpha = 13$ МэВ основным становится механизм образования составного ядра.
 - в) Рассчитаны спектроскопические амплитуды отделения нейтронов в ядре $^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$, необходимые для определения нейтронной периферии в различных состояниях ^{14}C в предположении механизмов передачи динейтронного кластера и независимой передачи нейтронов в реакции $^{12}\text{C}(t, p)^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$.
 - д) Продолжены работы в рамках «Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН» по исследованию в области структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ и показано, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения «развальшой» частицы от энергии квазисвязанного синглетного pp -состояния.
- Проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям реакции $^{11}\text{B}({}^3\text{He}, d)^{12}\text{C}$. Исследовались переходы в основное и в восемь возбужденных состояний ядра ^{12}C при энергиях возбуждения 4.44, 7.65, 9.64, 13.35, 16.57, 20.98, 21.6 и 22, 4 МэВ. Впервые определена возможная спин-четность 3^- и изоспин $T = 0$ для состояния 20, 98 МэВ. Дополнительно проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц

на ^{12}C при 110 МэВ с возбуждением состояния 13.35 МэВ, который, совместно с анализом реакции срыва и оценкой средне-квадратичного радиуса, дал аргументы для назначения спин-четности 4^- и изоспина $T = 0$ для состояния 13.35 МэВ.

- Выполнен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{13}C при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояния 11,08 МэВ, что позволило оценить средне-квадратичный радиус этого состояния.
- В составе коллаборации *CLAS* изучена спиновая зависимость сечений рассеяния электронов на протонах при малых переданных импульсах ($0.012 \text{ ГэВ}^2 \leq Q^2 \leq 1.0 \text{ ГэВ}^2$).
- Выполнены работы в рамках «Договора о научно-методическом сотрудничестве между НИЯФ МГУ и ГНЦ РФ-ИМБП РАН», связанные с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов. Получены новые данные о влиянии гипомагнитных условий на развитие эмбрионов и следующих поколений японского перепела, а также на хромосомные нарушения семян салата, облученных быстрыми нейтронами.
- Получены новые результаты гистологических исследований кроветворных органов, печени и селезенки разновозрастных эмбрионов японского перепела, развитие которых проходило в условиях ослабленного магнитного поля Земли в 1000 раз в двух последовательных поколениях. Показано, что развитие зародышей птиц в гипомагнитных условиях оказывает влияние не только на эмбрионы и организмы, образовавшиеся из этих эмбрионов, но также в значительной степени на последующие поколения, вплоть до гибели всей популяции.
- На основе спектрометрии ядерного обратного рассеяния разработана методика определения неоднородности по плотности поверхностного слоя конструкционных и функциональных материалов, позволяющая проводить оценку устойчивости защитных покрытий во время коррозионных и тепловых испытаний, а также определять степень гомогенности порошковых материалов.
- Выполнен анализ и разработана теория *PCI* эффекта взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов с вакансией во внутренней оболочке. В отличие от известных теорий *PCI* эффектов, предложенный подход описывает временную зависимость этих эффектов. Конкретные расчёты проведены для Оже-распада атома криптона.
- Исследованы выходы фотоядерных реакций, протекающих при облучении иттербия естественного изотопного состава тормозными фотонами энергией до 55 МэВ. Показана возможность наработки и радиохимического выделения перспективного для медицины радионуклида $^{167}\text{Tm}^{69}$.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В области исследований фундаментальных проблем физики ядерных реакций были решены следующие задачи:

Обнаружено гигантское нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности — Нейтронная одночастичная структура изотопов Се исследовалась в рамках дисперсионной оптической модели. Показано, что нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности образуется, когда нейтроны занимают состояния с низким l : $4s_{1/2}$, $3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$. Рассчитанные среднеквадратичные радиусы этих состояний находятся в интервале от 10 до 12 фм, а радиусы соседних состояний равны 6 – 7 фм. Общее число нейтронов в состояниях гало превышает 2 при $N > 134$. Распределения плотности нейтронов изотопа ^{184}Ce с традиционным магическим числом нейтронов $N = 126$ и изотопа ^{198}Ce с $N = 140$ существенно различаются. Для последнего изотопа плотность нейтронов демонстрирует длинный хвост, который можно отнести к гигантскому гало.[1]

Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер [2]:

а) Выполнен анализ измеренных при энергии α -частиц 30.3 МэВ угловых распределений дифференциального сечения реакции $^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{31}\text{P}$ с образованием конечного ядра в основном ($1/2^+$), первом ($3/2^+$; 1.265 МэВ) и втором ($5/2^+$; 2.232 МэВ) возбужденных состояниях. Показано, что экспериментальные результаты удовлетворительно описываются (код *FRESCO*) в предположении механизма срыва протонного кластера. Для перехода на уровень $5/2^+$ возможен вклад механизма образования составного ядра в области больших углов вылета протонов.

б) Продолжен теоретический анализ угловых зависимостей дифференциального сечения реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$ с образованием конечного ядра в основном (0^+) и первом возбужденном (2^+ ; 2.235) МэВ состояниях. Показано, что при последовательном уменьшении энергии α -частиц от 30.3 МэВ до 13 МэВ вклад механизма срыва тритонного кластера, являющийся в этой реакции определяющим при $E_\alpha = 30$ МэВ, постепенно уменьшается, и при $E_\alpha = 13$ МэВ основным становится механизм образования составного ядра. Расчеты ориентационных характеристик реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, p\gamma)^{30}\text{Si}(2^+)$ при $E_\alpha = 30$ МэВ указывают на преимущественное заселение магнитного подсостояния ядра $^{30}\text{Si}(2^+)$ с максимальной проекцией спина $M = 2$ на ось, перпендикулярную плоскости реакции. Тензоры ориентации мультипольных моментов этого ядра имеют наибольшее значение при ранге $k = 2$.

в) Рассчитаны спектроскопические амплитуды отделения нейтронов в ядре $^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$, необходимые для определения нейтронной периферии в различных состояниях ^{14}C в предположении механизмов передачи динейтронного кластера и независимой передачи нейтронов в реакции $^{12}\text{C}(t, p)^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$.

г) Продолжены работы в рамках «Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН» по исследованию в области структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ и показано, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения «развальной» частицы от энергии квазисвязанного синглетного pp -состояния [3].

Проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям реакции $^{11}\text{B}(^3\text{He}, d)^{12}\text{C}$. Исследовались переходы в основное и в восемь возбужденных состояний ядра ^{12}C при энергиях возбуждения 4.44, 7.65, 9.64, 13.35, 16.57, 20.98, 21.6 и 22,4 МэВ. Подтверждены ранее известные спин-четности и изоспины состояний 4.44, 7.65, 9.64, 16.57 и 21.6 МэВ. Впервые определена возможная спин-четность 3^- и изоспин $T = 0$ для состояния 20,98 МэВ. Дополнительно проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{12}C при 110 МэВ с возбуждением состояния 13.35 МэВ, который, совместно с анализом реакции срыва и оценкой средне-квадратичного радиуса, дал аргументы для назначения спин-четности 4^- и изоспина $T = 0$ для состояния 13.35 МэВ.[4]

Выполнен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{13}C при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояния 11,08 МэВ, что позволило оценить средне-квадратичный радиус этого состояния. Оказалось, что средне-квадратичный радиус совпадает в пределах погрешностей с радиусом состояния 8.86 МэВ в ^{13}C и состояния Хойла в ^{12}C . Показано, что состояние $3/2^-$, 9.90 МэВ и его изобарный аналог в ^{13}N – состояние $3/2^-$, 9.48 МэВ имеют нормальный не увеличенный радиус. Этот результат является аргументом в пользу подобия структур этих состояний [5].

В составе коллаборации *CLAS* изучена спиновая зависимость сечений рассеяния электронов на протонах при малых переданных импульсах ($0.012 \text{ ГэВ}^2 \leq Q^2 \leq 1.0 \text{ ГэВ}^2$). Этот кинематический диапазон удобен для проверки предсказаний различных теорий спиновой структуры протонов. Полученные данные согласуются с правилом сумм Герасимова – Дрелла – Хирна, фундаментальным предсказанием квантовой хромодинамики, которое связывает аномальный магнитный момент протона со спин-зависимыми сечениями рассеяния [6].

В области исследований прикладных вопросов физики ядерных реакций были решены следующие задачи:

Выполнены работы в рамках «Договора о научно-методическом сотрудничестве между НИЯФ МГУ и ГНЦ РФ-ИМБП РАН», связанные с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов [7]. Получены новые данные о влиянии гипомагнитных условий на развитие эмбрионов и следующих поколений японского перепела, а также на хромосомные нарушения семян салата, облученных быстрыми нейтронами.

Показано, что при прорастании в гипомагнитных условиях семян салата посевного *LactucasativaL.* облученного нейтронами со средней энергией 1.6 МэВ в дозе 10 Гр, происходит увеличение процента клеток с хромосомными абберациями в корневой меристеме проростков. Отмечено синергическое взаимодействие гипомагнитного и ионизирующего факторов по критерию клеток с хромосомными абберациями [8,9].

Получены новые результаты гистологических исследований кроветворных органов, печени и селезенки разновозрастных эмбрионов японского перепела, развитие которых проходило в условиях ослабленного магнитного поля Земли в 1000 раз в двух последовательных поколениях [10]. Показано, что развитие зародышей птиц в гипомагнитных условиях оказывает влияние не только на эмбрионы и организмы, образовавшиеся из этих эмбрионов,

но также в значительной степени на последующие поколения, вплоть до гибели всей популяции.

На основе спектрометрии ядерного обратного рассеяния разработана методика определения неоднородности по плотности поверхностного слоя конструкционных и функциональных материалов, позволяющая проводить оценку устойчивости защитных покрытий во время коррозионных и тепловых испытаний, а также определять степень гомогенности порошковых материалов. Предложенная методика основана на изменении энергетического строглинга при рассеянии на ядрах мишени при различных степенях однородности исследуемых материалов. В дальнейшем данный эффект будет использован для повышения качества проводимого анализа [11].

Выполнен анализ и разработана теория эффекта взаимодействия в конечном состоянии (*post-collision interaction, PCI*) при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов с вакансией во внутренней оболочке. В отличие от известных теорий *PCI* эффектов, предложенный подход описывает временную зависимость этих эффектов, в частности, зависимость от длительности возбуждающего фотонного импульса и от времени жизни вакансии. Развита теория основана на квантово-механическом описании временного развития Оже-процесса. Конкретные расчёты проведены для Оже-распада атома криптона. Результаты расчётов важны для готовящихся экспериментов по изучению *PCI* эффектов при выбивании Оже-электронов в терагерцовом электромагнитном поле [12].

Исследованы выходы фотоядерных реакций, протекающих при облучении иттербия естественного изотопного состава тормозными фотонами энергией до 55 МэВ. Показана возможность наработки и радиохимического выделения перспективного для медицины радионуклида ${}_{167}\text{Tm}^{69}$ [13,14,15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные задачи седьмого этапа НИР были успешно выполнены. Получены следующие основные результаты:

- Обнаружено гигантское нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности — Показано, что нейтронное гало в изотопах Се вблизи границы нейтронной стабильности образуется, когда нейтроны занимают состояния с низким l : $4s_{1/2}$, $3d_{5/2}$ и $3d_{3/2}$. Рассчитанные среднеквадратичные радиусы этих состояний находятся в интервале от 10 до 12 фм. Распределение плотности нейтронов изотопа ^{198}Ce с $N = 140$ демонстрирует длинный хвост, который можно отнести к гигантскому гало.
- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер:
 - а) Выполнен анализ измеренных при энергии α -частиц 30.3 МэВ угловых распределений дифференциального сечения реакции $^{28}\text{Si}(\alpha, p)^{31}\text{P}$ с образованием конечного ядра в основном ($1/2^+$), первом ($3/2^+$; 1.265 МэВ) и втором ($5/2^+$; 2.232 МэВ) возбужденных состояниях. Показано, что экспериментальные результаты удовлетворительно описываются в предположении механизма срыва протонного кластера. Для перехода на уровень $5/2^+$ возможен вклад механизма образования составного ядра в области больших углов вылета протонов.
 - б) Продолжен теоретический анализ угловых зависимостей дифференциального сечения реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$ с образованием конечного ядра в основном (0^+) и первом возбужденном (2^+ ; 2.235) МэВ состояниях. Показано, что при последовательном уменьшении энергии α -частиц от 30.3 МэВ до 13 МэВ вклад механизма срыва тритонного кластера, являющийся в этой реакции определяющим при $E_\alpha = 30$ МэВ, постепенно уменьшается, и при $E_\alpha = 13$ МэВ основным становится механизм образования составного ядра.
 - в) Рассчитаны спектроскопические амплитуды отделения нейтронов в ядре $^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$, необходимые для определения нейтронной периферии в различных состояниях ^{14}C в предположении механизмов передачи динейтронного кластера и независимой передачи нейтронов в реакции $^{12}\text{C}(t, p)^{14}\text{C}(0^+, 1^-, 3^-)$.
 - д) Продолжены работы в рамках «Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН» по исследованию в области структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ и показано, что при определенных кинематических условиях имеется прямая зависимость формы энергетического распределения «развальшой» частицы от энергии квазисвязанного синглетного pp -состояния.
- Проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям реакции $^{11}\text{B}({}^3\text{He}, d)^{12}\text{C}$. Исследовались переходы в основное и в восемь возбужденных состояний ядра ^{12}C при энергиях воз-

буждения 4.44, 7.65, 9.64, 13.35, 16.57, 20.98, 21.6 и 22,4 МэВ. Впервые определена возможная спин-четность 3^- и изоспин $T = 0$ для состояния 20,98 МэВ. Дополнительно проведен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{12}C при 110 МэВ с возбуждением состояния 13.35 МэВ, который, совместно с анализом реакции срыва и оценкой средне-квадратичного радиуса, дал аргументы для назначения спин-четности 4^- и изоспина $T = 0$ для состояния 13.35 МэВ.

- Выполнен анализ новых экспериментальных данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния α -частиц на ^{13}C при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояния 11,08 МэВ, что позволило оценить средне-квадратичный радиус этого состояния.
- В составе коллаборации *CLAS* изучена спиновая зависимость сечений рассеяния электронов на протонах при малых переданных импульсах ($0.012 \text{ ГэВ}^2 \leq Q^2 \leq 1.0 \text{ ГэВ}^2$).
- Выполнены работы в рамках «Договора о научно-методическом сотрудничестве между НИЯФ МГУ и ГНЦ РФ-ИМБП РАН», связанные с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов. Получены новые данные о влиянии гипомагнитных условий на развитие эмбрионов и следующих поколений японского перепела, а также на хромосомные нарушения семян салата, облученных быстрыми нейтронами.
- Получены новые результаты гистологических исследований кроветворных органов, печени и селезенки разновозрастных эмбрионов японского перепела, развитие которых проходило в условиях ослабленного магнитного поля Земли в 1000 раз в двух последовательных поколениях. Показано, что развитие зародышей птиц в гипомагнитных условиях оказывает влияние не только на эмбрионы и организмы, образовавшиеся из этих эмбрионов, но также в значительной степени на последующие поколения, вплоть до гибели всей популяции.
- На основе спектрометрии ядерного обратного рассеяния разработана методика определения неоднородности по плотности поверхностного слоя конструкционных и функциональных материалов, позволяющая проводить оценку устойчивости защитных покрытий во время коррозионных и тепловых испытаний, а также определять степень гомогенности порошковых материалов.
- Выполнен анализ и разработана теория *PCI* эффекта взаимодействия в конечном состоянии при Оже распаде фотовозбужденных состояний атомов с вакансией во внутренней оболочке. В отличие от известных теорий *PCI* эффектов, предложенный подход описывает временную зависимость этих эффектов. Конкретные расчёты проведены для Оже-распада атома криптона.
- Исследованы выходы фотоядерных реакций, протекающих при облучении иттербия естественного изотопного состава тормозными фотонами энергией до 55 МэВ. Показана возможность наработки и радиохимического выделения перспективного для медицины радионуклида $^{167}\text{Tm}^{69}$.

Список использованных источников

- 1 Klimochkina A., Bespalova O. //Giant neutron halo in Ce isotopes near the neutron drip line// в сборнике - LXXI International Conference "NUCLEUS - 2021. Nuclear physics and elementary particle physics. Nuclear physics technologies", г. Санкт-Петербург, Россия, 20-25 сентября 2021 Online. Book of Abstracts, место издания Saint - Petersburg University, Saint - Petersburg, с. 72-72
- 2 Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V., Tiurin I.S., Alibaeva A.G. // Orientation Features of the 3^- State of the ^{14}C Nucleus at 6.73 MeV in the Reaction $^{13}\text{C}(d, p\gamma)^{14}\text{C}$.// Physics of Atomic Nuclei, издательство - Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 2021, V. 84, № 3, с. 236-243.;
Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Тюрин И.С., Алибаева А.Г. Ориентационные характеристики ядра $^{14}\text{C}(3^-; 6.73 \text{ МэВ})$ в реакции $^{13}\text{C}(d, p\gamma)^{14}\text{C}$.// в журнале - Ядерная физика, издательство Наука (М.), 2021, том 84, № 3, с. 186-193.
- 3 Konobeevskia E.S., Afonin A.A., Kasparov A.A., Lebedev V.M., Mitcuk V.V., Mordovskoy M.V., Spassky A.V., Zuyev S.V. //Extracting the Energy of the Virtual pp State Produced in the $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ Reaction.// в журнале - Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, издательство Allerton Press Inc. (United States), 2021, том 85, № 5, с. 530-533.
Конобеевский Е.С., Афонин А.А., Каспаров А.А., Лебедев В.М., Мицук В.В., Мордовской М.В., Спасский А.В., Зуев С.В. Возможность извлечения энергии виртуального pp -состояния в реакции $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$.// в журнале Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2021, том 85, № 5, с. 685-689.
- 4 Demyanova A.S., Danilov A.N., Dmitriev S.V., Ogloblin A.A., Starastsin V.I., Goncharov S.A., Janseitov D.M. //Search for Exotic States in ^{13}C // в журнале - JETP Letters, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), 2021, том 114, № 6, с. 303-308
- 5 Demyanova A., Starastsin V., Ogloblin A., Danilov A., Dmitriev S., Trzaska W., Heikkinen P., Belyaeva T., Goncharov S., Maslov V., Sobolev Y., Gurov Y., Chernyshev B., Burtebaev N., Janseitov D. //The spin-parities of the 13.35 MeV state and high-lying excited states around 20 MeV in ^{12}C nucleus// в журнале European Physical Journal A, издательство Springer Verlag (Germany), 2021, том 57, с. 1-13
- 6 X. Zheng, A. Deur, H. Kang et al.// Measurement of the proton spin structure at long distances// Nature Physics. — 2021. — Vol. 17. — P. 736-741.
- 7 Trukhanov K.A., Onuchina M.R., Lebedev V.M., Spassky A.V. //Prospects for human protection from hypomagnetic conditions during flights outside the earth's magnetosphere and from periodic changes in the level of the geomagnetic field during an orbital flight// (Стендовый доклад). 43rd COSPAR Scientific Assembly 2021, Sydney, International Convention Centre, Австралия, 28 января - 4 февраля 2021

- 8 Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В., Труханов К.А. //Цитогенетические эффекты в корневой меристеме проростков салата при облучении семян быстрыми нейтронами в дозе 10 Гр и их модификация гипомангнитными условиями проращивания.// В журнале Биофизика, издательство Наука (М.), 2021, том 66, № 6, с. 1171-1177.
- 9 Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В., Труханов К.А., Иноземцев К.О., Толочек Р.В. //Цитогенетические эффекты в корневой меристеме и прорастание семян салата, облучённых ускоренными ионами углерода, при проращивании в гипомангнитных условиях.// в сборнике – Тезисы VIII съезда по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность), место издания – Москва, с. 250-250
- 10 Дадашева О. А., Пинегин С.А, Гурьева Т.С., Медникова Е.И., Спасский А.В., Лебедев В.М., Сычев В.Н. //Гистологическая картина кроветворных органов эмбрионов японского перепела, развившихся в условия ослабленного магнитного поля земли в двух последовательных поколениях.// В журнале – Авиакосмическая и экологическая медицина, издательство – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем Российской академии наук (Москва), 2021, том 55, № 6.
- 11 Ковальков В.К., Юров Д.С., Ткаченко Н.В., Каменских А.И. //Приповерхностный слой твердого сплава 8 после энергетического воздействия.// В сборнике – Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы 18-й Международной научно-технической конференции, 19-20 октября 2021 г, место издания – Пробел-2000 Москва, с. 236-239
- 12 Bermudez Macias I.J., Sazhina I.P., Ivanov R., D’usterer S., Kabachnik N.M. //Time-dependent post-collision-interaction effects in THz-field-assisted Auger decay.// В журнале – Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, издательство American Physical Society (United States), том 104, № 5, с. 053102 (2021).
- 13 Egorova B.V. , Kalmykova T.P., Zubenko A.D., Shchukina A.A., Karnoukhova V.A., Likhoshestova D.V., Priselkova A. B., Fedorov Y.V., Fedorova O.A., Kalmykov S.N. //Comparative study of macrocyclic and acyclic picolinate derivatives for chelation of copper cations// в журнале – European Journal of Inorganic Chemistry, издательство – John Wiley & Sons Ltd. (United Kingdom) 2021, Issue 45, p 4700-4709
- 14 Aliev R.A., Priselkova A.B., Khankin V.V., Petrov V.G., Belyshev S.S., Kuznetsov A.A. //Production of medical radioisotope ^{167}Tm by photonuclear reactions on natural ytterbium// в журнале – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, издательство — Elsevier BV (Netherlands), 2021 , том 508, с. 19-23
- 15 Зверева И.М., Кузнецов А.А., Морозов С.Б., Приселкова А.Б., Сомиков А.В., Янин Л.А. //Учебная спектрометрическая установка для определения сечения взаимодействия гамма-квантов с веществом, использу-

ющая источник активностью ниже МЗА// в сборнике - Проблемы теории и практики инновационного развития и интеграции современной науки и образования [Электронный ресурс]: материалы II Международной междисциплинарной конференции (г. Москва, МГОУ, 19 февраля 2020 г.), издательство МГОУ (Москва), 2021 , с. 100-106

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2021 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные сред- ства в виде субси- дии на выполнение фундаментальных научных исследо- ваний в соответ- ствии с госзадани- ем МГУ, часть 2 (р. 01 10)	17 763 000,0	17 763 000,0