

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 сотруд- _____ (Галанина Л.И.)

ник, кандидат физико-
математических наук

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

старший научный сотруд- _____ (Дикунов А.К.)
ник, кандидат физико- _____ (Дроздов В.А.)

математических наук

главный научный со- _____ (Егорова И.М.)
трудник, доктор физико- _____ (Зарубин А.Б.)

математических наук, про-
фессор по специальности

стажер _____ (Зеленская Н.С.)

научный сотрудник _____ (Каменских А.И.)
ведущий научный со- _____ (Кащеева С.С.)

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

ведущий научный со- _____ (Климочкина А.А.)
трудник, доктор физико- _____ (Комаров В.В.)

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

_____ (Лебедев В.М.)

_____ (Макарова А.Н.)

_____ (Меднова В.Н.)

ведущий специалист	_____	(Орлова Н.В.)
ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, доцент по кафедре	_____	(Платонов С.Ю.)
ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор по специальности	_____	(Попова А.М.)
научный сотрудник	_____	(Приселкова А.Б.)
научный сотрудник, кандидат физико-математических наук	_____	(Рылова А.Е.)
ведущий специалист	_____	(Сажина И.П.)
старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности	_____	(Спасская Т.И.)
	_____	(Спасский А.В.)
младший научный сотрудник, кандидат технических наук	_____	(Сюткина Л.Н.)
ведущий специалист , кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности	_____	(Ткаченко Н.В.)
	_____	(Фотина О.В.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

гипомагнитные и радиационные условия, ядерные реакции, механизмы ядерной реакции, оптическая модель, радиофармпрепараты, деление, 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 15,

Приложение А — Таблица 1А,

Приложение В — pdf файл с иллюстрациями,

Приложение С — pdf файл с версией отчёта

Основные задачи восьмого этапа НИР.

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

- Планировалось провести исследование влияния зависимости диффузности ядерного потенциала от нейтрон-протонной асимметрии на эволюцию одночастичных спектров ядер при приближении к границе нейтронной стабильности для изотопов Si, для изотопов ядер от Ca до Ni и для изотопов Sn.
- Планировалось провести анализ результатов ряда экспериментов, выполненных на циклотроне НИИЯФ МГУ и связанных с измерениями в наиболее полных кинематических условиях.
- Совместно с лабораторией атомного ядра ИЯИ РАН (в рамках соответствующего Договора о научном сотрудничестве) выполнить на циклотроне У-120 изучение протон-протонных корреляций в реакции $d + {}^1H \rightarrow n + p + p$ при энергии дейтронов 15 МэВ.

- Для ядра ^{13}C предполагалось проведение теоретического анализа полученных ранее и новых экспериментальных данных по неупругому рассеянию $\alpha + ^{13}\text{C}$ при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояний 3.09, 3.68, 7.55, 8.86, 9.90, 10.996 и 11.08 МэВ. Целью такого анализа являлось исследование внутренней структуры ядра, определение его размеров в возбужденных состояниях.

В рамках продолжения исследований прикладных задач предполагалось проведение следующих работ:

- Продолжить исследования 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.
- Продолжение исследований α – эмиттерного РФП на основе ^{211}At с целью возможного использования указанного РФП для астатотерапии при минимальном радиационном поражении органов пациента.
- Исследование распределения микрогелей карбоксиметилцеллюлозы с пришитыми ионами $^{67}\text{Cu}^{2+}$ в органах лабораторных мышей и сопоставление результатов анализа с распределением свободных ионов $^{67}\text{Cu}^{2+}$ из $^{67}\text{CuCl}_2$.

Основные полученные результаты восьмого этапа НИР.

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

- Исследовано влияние зависимости параметра диффузности a_{HF} ядерного потенциала от нейтрон-протонной асимметрии на эволюцию одночастичных спектров ядер продемонстрировало важность учета этой зависимости при приближении к границе нейтронной стабильности.
- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер: Проведен анализ результатов ряда экспериментов, выполненных на циклотроне НИИЯФ МГУ и связанных с измерениями в наиболее полных кинематических условиях. В частности, выполнен анализ экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений реакций $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ в рамках метода связанных каналов с учетом срыва протона, передачи тяжелого кластера ^{12}C и в модели составного ядра. При описании экспериментальных сечений использованы спектроскопические амплитуды, рассчитанные в оболочечной модели для чистых и смешанных конфигураций волновых функций (ВФ) ядер. Результаты анализа подтвердили двойственную природу структуры дважды магического ядра ^{16}O . А именно, ВФ могут быть как оболочечными, так и α -кластерными с конфигурациями 4α и $\alpha + ^{12}\text{C}$. Из анализа вклада каждого отдельного механизма в расчетные дифференциальные сечения (α, α) - и (α, t) -реакций показано, что ВФ ядра ^{16}O в основном состоянии преимущественно определяется 4α -тетраэдной и оболочечной конфигурациями.

Добавление к конфигурации $\alpha + {}^{12}\text{C}$ компоненты с максимальным значением орбитального момента характерно для возбужденного состояния 3^- ядра ${}^{16}\text{O}$. Для исследованных реакций на основе восстановленных матриц плотности конечного ядра впервые получены также экспериментальные данные по выстроенности ядра ${}^{16}(3^-)$.

- 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. С помощью метода определения энергии синглетного квазисвязанного pp-состояния в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ разработана процедура получения экспериментальных данных по измерению длины pp-рассеяния, а также процедура извлечения из экспериментальных данных величины энергии протон-протонного состояния с использованием метода минимума χ^2 .
- В результате анализа экспериментальных данных по реакции неупругого рассеяния $\alpha + {}^{13}\text{C}$ были определены размеры ядра ${}^{13}\text{C}$ в возбужденных состояниях до энергий 11 МэВ. Получена информация об структурных особенностях ядра ${}^{13}\text{C}$ в этих состояниях, в частности, о наличии нейтронного гало в возбужденном состоянии 3.09 МэВ

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 результаты исследования влияния ослабленного магнитного поля, характерного для таких полетов на репродуктивную функцию взрослых особей самцов японского перепела в трех последовательных поколениях; при этом в первом поколении эмбриогенез проходил в условиях ослабленного более чем в 1000 раз геомагнитного поля, во 2-м и 3-м поколениях – в условиях магнитного поля Земли. Показано нарушение репродуктивной функции у перепелов во всех опытных группах, выражающееся в патологии сперматогенеза.
- По результатам биологических исследований α -эмиттерного РФП на основе ${}^{211}\text{At}$ выполнены оценки для пациентов поглощенных и эффективных доз в щитовидной железе, с учетом обеспечения требуемого терапевтического эффекта. Результаты оценок показали, что дозовые нагрузки в щитовидной железе при достижении требуемого терапевтического эффекта значительно превышают соответствующие дозовые нагрузки на другие органы и ткани пациента, что, в свою очередь, позволяет надеяться на высокую эффективность астатотерапии при минимальном поражении остальных органов пациента.
- Проведено теоретическое моделирование распределения микрогелей карбоксиметилцеллюлозы с пришитыми ионами ${}^{67}\text{Cu}^{2+}$ между органами лабораторных мышей. Показано, что микрогели выводятся как через печень, так и через почки. Дополнительное изучение распределения микрочастиц [3H]СМС и микрогелей [3H]СМС-Cu показало отсутствие выделения меди из микрогелей *in vivo*.

Определения, обозначения и сокращения.

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

ВФ — волновые функции,

ДОМ — дисперсионная оптическая модель,

СП — среднее поле,

МДМ — модифицированная дифракционная модель

R_m — среднеквадратичный радиус ядра

РФП — радиофармпрепарат

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 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.

План работ восьмого этапа НИР был следующим :

- Продолжить исследование влияния зависимости диффузности ядерного потенциала от нейтрон-протонной асимметрии на эволюцию одночастичных спектров ядер при приближении к границе нейтронной стабильности. Такое исследование важно для повышения точности предсказаний дисперсионной оптической модели в отношении нестабильных ядер.
- Исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер.
- Провести теоретический анализ для ядра ^{13}C полученных ранее и новых экспериментальных данных по неупругому рассеянию $\alpha + ^{13}\text{C}$ при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояний 3.09, 3.68, 7.55, 8.86, 9.90, 10.996 и 11.08 МэВ. Цель такого анализа – исследование внутренней структуры ядра, определение его размеров в возбужденных состояниях.
- Продолжение исследований, связанных с радиационной и гипомагнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.
- Продолжение исследований α – эмиттерного РФП на основе ^{211}At с целью возможного использования указанного РФП для астатотерапии при минимальном радиационном поражении органов пациента.

Основные полученные результаты восьмого этапа НИР .

- Выполнены расчеты одночастичных нейтронных энергий изотопов Si, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Sn по дисперсионной оптической модели в предположении роста параметра диффузности a_{HF} хартри-фоковской составляющей потенциала с увеличением нейтронного избытка. Показано, что введение такой зависимости существенно улучшает описание нейтронных одночастотных энергий нейтронно-избыточных изотопов Si. Также показано, что величина энергетической щели между нейтронными состояниями $1f_{5/2}$ и $2p_{3/2}$ в ядрах

Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, $1g_{7/2}$ и $2d_{5/2}$ в изотопах Sn и протонными состояниями $2s_{1/2}$ и $1d_{3/2}$ в изотопах Ca очень чувствительна к зависимости геометрических параметров r_{HF} и a_{HF} от нейтронного избытка.

- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер. Проведен анализ результатов ряда экспериментов, связанных с измерениями в наиболее полных кинематических условиях и выполненных на циклотроне НИИЯФ МГУ. Такие эксперименты позволяют получать информацию о характеристиках ориентированных ядер, которые в принципе не могут быть получены в прямых экспериментах. В частности, выполнен анализ экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений реакций $^{16}O(\alpha, \alpha)^{16}O(g.s., 3^-)$ и $^{15}N(\alpha, t)^{16}O(g.s., 3^-)$ в рамках метода связанных каналов с учетом срыва протона и передачи тяжелого кластера ¹² и в рамках модели составного ядра. Для исследованных реакций на основе восстановленных матриц плотности конечного ядра впервые получены также экспериментальные угловые зависимости выстроенности ядра $^{16}O(3^-)$.

- 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. С помощью метода определения энергии синглетного квазисвязанного pp -состояния в реакции $d + ^1H \rightarrow n + p + p$ разработана процедура получения экспериментальных данных по измерению длины pp -рассеяния, а также процедура извлечения из экспериментальных данных величины энергии протон-протонного состояния.

- В результате анализа экспериментальных данных по реакции неупругого рассеяния $\alpha + ^{13}C$ были определены размеры ядра ^{13}C в возбужденных состояниях до энергий 11 МэВ. Получена информация об структурных особенностях ядра ^{13}C в этих состояниях, в частности, о наличии нейтронного гало в возбужденном состоянии 3.09 МэВ

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 результаты исследования влияния ослабленного магнитного поля, характерного для таких полетов на репродуктивную функцию взрослых особей самцов японского перепела в трех последовательных поколениях; при этом в первом поколении эмбриогенез проходил в условиях ослабленного более, чем в 1000 раз геомагнитного поля, во 2-м и 3-м поколениях - в условиях магнитного поля Земли. Показано нарушение репродуктивной функции у перепелов во всех опытных группах, выражающееся в патологии сперматогенеза. Представленные результаты имеют практическую значимость не только для птиц в условиях космического полета, но и для животных, а также для человека, в связи с тем, что многим людям приходится работать в условиях ослабленного магнитного поля (метрополитен, горнорудные шахты и т.п.).

- По результатам биологических исследований α - эмиттерного РФП на основе ^{211}At выполнены оценки для пациентов поглощенных и эффективных доз в щитовидной железе, с учетом обеспечения требуемого терапевтического эффекта. Результаты оценок показали, что дозовые нагрузки в щито-

видной железе при достижении требуемого терапевтического эффекта значительно превышают соответствующие дозовые нагрузки на другие органы и ткани пациента, что, в свою очередь, позволяет надеяться на высокую эффективность астатотерапии при минимальном поражении остальных органов пациента.

- Исследовано распределение микрогелей карбоксиметилцеллюлозы с пришитыми ионами $^{67}\text{Cu}^{2+}$ между органами лабораторных мышей. Результаты сопоставляются с распределением свободных ионов $^{67}\text{Cu}^{2+}$ из $^{67}\text{CuCl}_2$. Показано, что микрогели выводятся как через печень, так и через почки. Дополнительное изучение распределения микрочастиц [3Н]СМС и микрогелей [3Н]СМС-Сu показало отсутствие выделения меди из микрогелей *in vivo*.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

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

- Продолжены исследования влияние зависимости диффузности ядерного потенциала от нейтрон-протонной асимметрии на эволюцию одночастичных спектров ядер при приближении к границе нейтронной стабильности. Такое исследование важно для повышения точности предсказаний дисперсионной оптической модели в отношении нестабильных ядер. Выполнены расчеты одночастичных нейтронных энергий изотопов Si, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Sn по дисперсионной оптической модели в предположении роста параметра диффузности a_{HF} хартри-фоковской составляющей потенциала с увеличением нейтронного избытка. Показано, что введение такой зависимости существенно улучшает описание нейтронных одночастотных энергий нейтронно-избыточных изотопов Si (см. Приложение В, рис.1). Также отмечено, что к значениям геометрических параметров r_{HF} и a_{HF} чувствительна величина энергетической щели между нейтронными состояниями $1f_{5/2}$ и $2p_{3/2}$ в стабильных изотопах ядер Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, $1g_{7/2}$ и $2d_{5/2}$ в изотопах Sn и протонными состояниями $2s_{1/2}$ и $1d_{3/2}$ в изотопах Ca. Следует иметь в виду, что на эти щели оказывает влияние нейтрон-протонное тензорное взаимодействие, которое явно не учитывается в дисперсионной оптической модели. Расчет зарядовых плотностей изотопов олова также продемонстрировал рост протяженности поверхности распределения протонов в нейтронно-избыточном изотопе ${}_{132}\text{Sn}$ по сравнению с нейтронно-дефицитным изотопом ${}_{100}\text{Sn}$, указывающий на следование протонной плотности вслед за нейтронной [1]
- Проведен анализ результатов ряда экспериментов, выполненных на циклотроне НИИЯФ МГУ и связанных с измерениями в наиболее полных кинематических условиях. В частности, выполнен анализ экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений реакций ${}^{16}\text{O}(\alpha, \alpha){}^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ и ${}^{15}\text{N}(\alpha, t){}^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ в рамках метода связанных каналов с учетом срыва протона и передачи тяжелого кластера ${}^{12}\text{C}$ и в рамках модели составного ядра. При описании экспериментальных сечений использованы спектроскопические амплитуды, рассчитанные в оболочечной модели для чистых и смешанных конфигураций ВФ ядер [2]. Результаты анализа подтвердили двойственную природу структуры дважды магического ядра ${}^{16}\text{O}$. А именно, ВФ могут быть как оболочечными, так и α -кластерными с конфигурациями 4α и $\alpha + {}^{12}\text{C}$. Из анализа вклада каждого отдельного механизма в расчетные дифференциальные сечения (α, α) - и (α, t) -реакций показано, что ВФ ядра ${}^{16}\text{O}$ в основном состоянии преимущественно определяется 4α -тетраэдной и оболочечной конфигурациями. Добавление к конфигурации $\alpha + {}^{12}\text{C}$ компоненты с максимальным значением орбитального момента характерно для возбужденного состояния 3^- ядра ${}^{16}\text{O}$ [3-5]. Для исследованных реакций на основе восстановленных матриц плотности конечного ядра впервые получены также экспериментальные угловые зависимости выстроенности ядра ${}^{16}\text{O}(3^-)$.

- 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. С помощью метода определения энергии синглетного квазисвязанного pp -состояния в реакции $d + {}^1H \rightarrow n + p + p$ разработана процедура получения экспериментальных данных по измерению длины pp -рассеяния, а также процедура извлечения из экспериментальных данных величины энергии протон-протонного состояния с использованием метода минимума χ^2 . [6].
- Одной из наиболее фундаментальных и важных характеристик ядра является его размер, определяемый радиусом распределения плотности его нуклонов. Развитие методов измерения радиусов ядер в возбужденных состояниях привело к открытию новых классов состояний, которые получили название «размерных изомеров». Такие состояния часто принадлежат к определенным вращательным полосам, и внутренняя структура ядер в таких состояниях связана с такими особенностями, например, как наличие нуклонного гало, или различного типа кластерных конфигураций.

С целью исследования таких состояний в ядре ${}^{13}C$ проведен теоретический анализ в рамках метода искаженных волн (DWBA) полученных ранее и новых экспериментальных данных по неупругому рассеянию $\alpha + {}^{13}C$ при энергиях 65 и 90 МэВ с возбуждением состояний 3.09, 3.68, 7.55, 8.86, 9.90, 10.996 и 11.08 МэВ. [7]

Оптические потенциалы для входного и выходного канала построены на основе полумикроскопического подхода в рамках дисперсионной оптической модели (SMDOM). Такая модель с использованием дисперсионных соотношений эффективно имеет меньшее число варьируемых параметров, чем обычная феноменологическая оптическая модель, где весь набор определяется для каждой энергии. Это позволяет уменьшить неоднозначность анализа. В рамках этого подхода осуществлен микроскопический расчет потенциала среднего поля (СП) на основе метода двукратной свертки с учетом обменной компоненты. В частности, для потенциала СП определена эмпирическая зависимость от энергии объемного интеграла. Из анализа данных упругого рассеяния в диапазоне энергий $E_{lab} = 48.7 - 90$ МэВ получены параметры потенциала SMDOM. Использование радужных эффектов, наблюдаемых в дифференциальных сечениях, также позволило снизить неоднозначность в определении параметров оптического потенциала, а плавная зависимость параметров полученного потенциала от энергии в рассматриваемом интервале дает возможность оценить значения параметров и интегральных характеристик потенциала при энергиях выходных каналов неупругого рассеяния. Получено хорошее описание данных по упругому рассеянию.

Анализ данных для состояний 3.68 и 7.55 МэВ выполнен в предположении принадлежности этих состояний вращательной полосе основного состояния. Данные хорошо описываются в области первых дифракционных осцилляций, подтверждая правильность сделанного предположения. При оценке в рамках Модифицированной дифракционной мо-

дели (МДМ) радиусы для этих состояний в пределах ошибок совпали с радиусом в основном состоянии, что также подтверждает принадлежность этих состояний к основной полосе.

Для других состояний применялись различные модели радиального неупругого формфактора – интегралу перекрытия волновых функций основного и возбужденного состояния ядра. Получены следующие результаты. Состояние $1/2^+$ (3.09) возможно рассматривать как одночастичное возбуждение валентного нейтрона. Полученная одночастичная волновая функция $2s_{1/2}$ валентного нейтрона имеет большую протяженность (ее среднеквадратичный радиус $R_n = 6.36$ Фм), обнаруживая признаки нейтронного гало. Оценка среднеквадратичного радиуса (R_m) ядра ^{13}C в этом состоянии $R_m = 2.8$ Фм. Аналогичный радиус был получен и в рамках оценки по МДМ (2.9 ± 0.2 Фм).

Состояния 8.86, 10.996 и 11.08 МэВ можно рассматривать как альфа-кластерные с увеличенным радиусом. Эти альфа-кластерные состояния могут выступать как аналоги состояния Хойла в ^{12}C . Формфакторы этих состояний показывают сходное поведение, что говорит в пользу близости свойств этих состояний. В пределах ошибок оцененные по МДМ радиусы этих состояний совпадают, и более того, близки к радиусу состояния Хойла. Сравнение формфактора состояния 9.90 МэВ с формфактором состояния 8.86 МэВ показывает сильно отличающееся поведение и меньшую пространственную протяженность для состояния 9.90 МэВ, что подтверждает полученный в рамках МДМ уменьшенный радиус.

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 [8,9]. Получены новые данные о влиянии гипомагнитных условий на развитие эмбрионов и следующих поколений японского перепела. Представлены результаты исследования влияния ослабленного в 1000 раз магнитного поля на репродуктивную функцию взрослых особей самцов японского перепела во всех трех последовательных поколениях; при этом в первом поколении эмбриогенез проходил в условиях геомагнитного поля, во 2-м и 3-м поколениях – в условиях магнитного поля Земли. Показано нарушение репродуктивной функции у перепелов во всех опытных группах, выражающееся в патологии сперматогенеза, которые привели к задержке полового диморфизма у самцов и увеличению срока начала яйцекладки у самок, а также снижению выводимости птенцов и увеличению количества неоплодотворенных яиц. Практическая значимость. Представленные результаты имеют практическую значимость не только для птиц, но и для животных, а также для человека, в связи с тем, что многим людям приходится работать в условиях ослабленного магнитного поля (метрополитен, горнорудные шахты и т.п.).

- Были продолжены исследования α - эмиттерного РФП на основе ^{211}At , в частности была исследована дозовая нагрузка от ^{211}At на органы и ткани лабораторных животных (самцов и самок крыс SD). По данным биологических испытаний выполнены оценки для пациентов поглощенных и эффективных доз в щитовидной железе для РФП «At 211», с учетом обеспечения требуемого терапевтического эффекта. Результат оценок показали, что дозовые нагрузки в щитовидной железе значительно превышают соответствующие дозовые нагрузки на другие органы и ткани пациента, что, в свою очередь, позволяет надеяться на высокую эффективность астатотерапии при минимальном поражении остальных органов пациента. [10]
- Исследовано распределение микрогелей карбоксиметилцеллюлозы с пришитыми ионами $^{67}\text{Cu}^{2+}$ между органами лабораторных мышей. Результаты сопоставляются с распределением свободных ионов $^{67}\text{Cu}^{2+}$ из $^{67}\text{CuCl}_2$. Показано, что микрогели выводятся как через печень, так и через почки. Дополнительное изучение распределения микрочастиц [3Н]СМС и микрогелей [3Н]СМС-Сu показало отсутствие выделения меди из микрогелей *in vivo*. [11]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- Исследование влияния зависимости параметра диффузности a_{HF} ядерного потенциала от нейтрон-протонной асимметрии на эволюцию одночастичных спектров ядер продемонстрировало важность учета этой зависимости при приближении к границе нейтронной стабильности.
- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер:

Проведен анализ результатов ряда экспериментов, выполненных на циклотроне НИИЯФ МГУ. В частности, выполнен анализ экспериментальных угловых распределений дифференциальных сечений реакций $^{16}O(\alpha, \alpha)^{16}O(g.s., 3^-)$ и $^{15}N(\alpha, t)^{16}O(g.s., 3^-)$ в рамках метода связанных каналов с учетом срыва протона и передачи тяжелого кластера ^{12}C и в рамках модели составного ядра. Результаты анализа подтвердили двойственную природу структуры дважды магического ядра ^{16}O . А именно, ВФ могут быть как оболочечными, так и α -кластерными с конфигурациями 4α и $\alpha + ^{12}C$. Из анализа вклада каждого отдельного механизма в расчетные дифференциальные сечения (α, α) - и (α, t) -реакций показано, что ВФ ядра ^{16}O в основном состоянии преимущественно определяется 4α -тетраэдной и оболочечной конфигурациями. Добавление к конфигурации $\alpha + ^{12}C$ компоненты с максимальным значением орбитального момента характерно для возбужденного состояния 3^- ядра ^{16}O . Для исследованных реакций на основе восстановленных матриц плотности конечного ядра впервые получены также экспериментальные угловые зависимости выстроенности ядра $^{16}O(3^-)$.

- 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. С помощью метода определения энергии синглетного квазисвязанного pp -состояния в реакции $d + ^1H \rightarrow n + p + p$ разработана процедура получения экспериментальных данных по измерению длины pp -рассеяния, а также процедура извлечения из экспериментальных данных величины энергии протон-протонного состояния с использованием метода минимума χ^2 .
- В результате анализа экспериментальных данных по реакции неупругого рассеяния $\alpha + ^{13}C$ были определены размеры ядра ^{13}C в возбужденных состояниях до энергий 11 МэВ. Получена информация об структурных особенностях ядра ^{13}C в этих состояниях, в частности, о наличии нейтронного гало в возбужденном состоянии 3.09 МэВ

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. Получены новые данные о влиянии гипомагнитных

условий на развитие эмбрионов и следующих поколений японского перепела. Представлены результаты исследования влияния ослабленного в 1000 раз магнитного поля на репродуктивную функцию взрослых особей самцов японского перепела во всех трех последовательных поколениях; при этом в первом поколении эмбриогенез проходил в условиях геомагнитного поля, во 2-м и 3-м поколениях – в условиях магнитного поля Земли. Показано нарушение репродуктивной функции у перепелов во всех опытных группах, выражающееся в патологии сперматогенеза, которые привели к задержке полового диморфизма у самцов и увеличению срока начала яйцекладки у самок, а также снижению выводимости птенцов и увеличению количества неоплодотворенных яиц. Представленные результаты имеют практическую значимость не только для птиц, но и для животных, а также для человека, в связи с тем, что многим людям приходится работать в условиях ослабленного магнитного поля (метрополитен, горнорудные шахты и т.п.).

- По результатам биологических исследований α - эмиттерного РФП на основе ^{211}At выполнены оценки для пациентов поглощенных и эффективных доз в щитовидной железе, с учетом обеспечения требуемого терапевтического эффекта. Результаты оценок показали, что дозовые нагрузки в щитовидной железе при достижении требуемого терапевтического эффекта значительно превышают соответствующие дозовые нагрузки на другие органы и ткани пациента, что, в свою очередь, позволяет надеяться на высокую эффективность астатотерапии при минимальном поражении остальных органов пациента.
- Исследовано распределение микрогелей карбоксиметилцеллюлозы с пришитыми ионами $^{67}\text{Cu}^{2+}$ между органами лабораторных мышей. Результаты сопоставляются с распределением свободных ионов $^{67}\text{Cu}^{2+}$ из $^{67}\text{CuCl}_2$. Показано, что микрогели выводятся как через печень, так и через почки. Дополнительное изучение распределения микрочастиц [3H]СМС и микрогелей [3H]СМС-Cu показало отсутствие выделения меди из микрогелей *in vivo*.

Список использованных источников

- 1 Беспалова О.В., Климошкина А.А. О зависимости диффузности поверхности ядер от нейтрон-протонной асимметрии и ее влиянии на эволюцию одночастичных спектров // Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ), 2022, том 53, № 2, с. 428-437
(Bespalova O.V., Klimochkina A.A. On the Dependence of the Nuclear Surface Diffuseness on the Neutron-Proton Asymmetry and Its Influence on the Evolution of the Single-Particle Spectra // Physics of Particles and Nuclei, 2022, v. 53, № 2, pp. 476-481. DOI10.1134/S1063779622020198).
- 2 L.I. Galanina, N.S. Zelenskaya. Spectroscopic amplitudes for pole mechanisms in $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha) ^{16}\text{O}(3^-)$ and $^{15}\text{N}(\alpha, t) ^{16}\text{O}(3^-)$ reactions. // LXXII International conference NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications, Moscow, July 11-16, 2022, Book of Abstracts - Amirit, Saratov, 2022. <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>. c. 177.

- 3 Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. Manifestation of the $^{16}\text{O}(\text{g.s.}; 3^-, 6.13 \text{ MeV})$ nucleus wave functions structure in the $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha) ^{16}\text{O}$ and $^{15}\text{N}(\alpha, t) ^{16}\text{O}$ reactions. Physics of Atomic Nuclei, издательство Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 2022, том 85, № 6.
- 4 Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. Study of the $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha) ^{16}\text{O}(3^-)$ and $^{15}\text{N}(\alpha, t) ^{16}\text{O}(3^-)$ reactions mechanism at $E\alpha = 30.3 \text{ MeV}$. // Доклад, LXXII International conference "Nucleus-2022: Fundamental problems and applications", Москва, Россия, 2022, 11-16 июля.
- 5 Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. Study of the $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha) ^{16}\text{O}(3^-)$ and $^{15}\text{N}(\alpha, t) ^{16}\text{O}(3^-)$ reactions mechanism at $E\alpha = 30.3 \text{ MeV}$, в сборнике LXXII International conference NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications, Moscow, July 11-16, 2022, Book of Abstracts, <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>, место издания Amirit Саратов, тезисы, с. 124.
- 6 Mitcuk V.V., Kasparov A.A., Mordovskoy M.V., Afonin A.A., Lebedev V.M., Spassky A.V. Preliminary data of the experiment on the study of proton-proton correlations in the $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ reaction // в сборнике LXXII International conference NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications, Moscow, July 11-16, 2022, Book of Abstracts. <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>, место издания Amirit Saratov, тезисы, 2022, с. 161.
- 7 Demyanova A. S., Danilov A. N., Starastin V. I., Leonova T. I., Goncharov S. A. Possible rotational structure of ^{13}C low-lying excited states 11-16, в сборнике LXXII International conference NUCLEUS-2022: Fundamental problems and applications, Moscow, July 11-16, 2022, Book of Abstracts. <https://events.sinp.msu.ru/event/8/attachments/181/875/nucleus-2022-book-of-abstracts-www.pdf>, место издания Amirit Saratov, тезисы, 2022, p.42
- 8 Литвин Е.Д., Дадашева О.А., Пинегин С.А., Гурьева Т.С., Медникова Е.И., Спасский А.В., Лебедев В.М., Сычев В.Н. Влияние гипوماгнитных условий среды на репродуктивную функцию самцов японского перепела (*Saturnix japonica*) в трех последовательных поколениях // в журнале Биомедицинская радиоэлектроника, издательство "Радиотехника" (Москва), том 25, № 1, с. 62-71.
- 9 Spassky D., Spassky A., Fedyunin F., Kozlova N., Zabelina E., Kasimova V., Buzanov O. Influence of proton irradiation on the optical properties of garnet $\text{Gd}_3\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$ ($x = 0,1,2,3$) single crystals, в сборнике Abstracts of the 10th Jubilee International Conference on Radiation in Various Fields of Research (RAD2022), 25-29 June 2022, Herceg-Novi, Montenegro, тезисы, с. 36.

- 10 Юминов О.А., Бондаренко Д.А., Дроздов В.А., Еременко Д.О., Мурашев А.Н., Платонов С.Ю., Фотина О.В., Биораспределение ^{211}At , Журнал: Успехи молекулярной онкологии. 2021, том 8, № 4, с. 158-159
- 11 Orlova M.A., Spiridonov V.V., Badun G.A., Trofimova T.P., Orlov A.P., Zolotova A.S., Priselkova A.B., Aleshin G.Yu, Chernysheva M.G., Yaroslavov A.A., Kalmykov S.N. In vivo behavior of carboxymethylcellulose based microgels containing ^{67}Cu в журнале Mendeleev Communications, издательство Elsevier BV (Netherlands), 2022, том 32, № 5, с. 658-660

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2022 году
Таблица А.1

Источник финансирования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные средства в виде субсидии на выполнение фундаментальных научных исследований в соответствии с госзаданием МГУ, часть 2 (р. 01 10)	19 285 000,0	