

МГУ имени М.В. Ломоносова

Отдел ядерных реакций

№ госрегистрации
122081100023-6

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК
539.142 Модели ядер
539.141 Ядерные силы

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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-

ник, кандидат физико-

математических наук

главный научный со-
трудник, доктор физико-

математических наук, про-

фессор по специальности

стажер

научный сотрудник

ведущий научный со-

трудник, доктор физико-

математических наук, до-

цент/с.н.с. по специальности

ведущий специалист

ведущий научный со-

трудник, доктор физико-

математических наук, доцент

по кафедре

научный сотрудник

_____ (Меднова В.Н.)

_____ (Орлова Н.В.)

_____ (Платонов С.Ю.)

_____ (Приселкова А.Б.)

ведущий специалист
старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности

_____(Рылова А.Е.)
_____(Спасская Т.И.)
_____(Спасский А.В.)

младший научный сотрудник,
кандидат технических наук
ведущий специалист, кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности

_____(Сюткина Л.Н.)
_____(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 12,

Заключение — стр 15,

Список использованных источников — стр 18,

Приложение А — Таблица 1А,

Приложение С — pdf файл с версией отчёта

Основные задачи десятого этапа НИР.

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

- Провести анализ в рамках ДОМ магических свойств, оценку радиусов нейтронных орбит и галоподобной структуры в ядрах. Исследовать эволюцию магических свойств чисел $N = 14, 16$ в изотонах. Исследовать зависимость разности энергий нейтронных и протонных состояний в зеркальных ядрах вблизи ^{48}Ni
- Продолжить работы по систематизации данных экспериментальных и теоретических исследований экзотических ИАС легких ядер, а также проведение исследований ИАС ядер с $A = 6$ и 12 на основе теоретического анализа новых экспериментальных данных по упругому рассеянию и реакциям передачи нуклонов с использованием различных моделей формфактора реакций, позволяющих получить информацию о распределении материи и радиусах ядер в исследуемых состояниях.

- Продолжить исследования ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер с целью исследования структуры малонуклонных систем, путём анализа экспериментальных данных, измеренных в наиболее полных кинематических условиях на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ.
- Совместно с лабораторией атомного ядра ИЯИ РАН (в рамках соответствующего Договора о научном сотрудничестве) продолжить изучение протон – протонных корреляций в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ на циклотроне У-120 при энергии дейтронов 15 МэВ.

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.
- Продолжить исследования по синтезу и биологическим испытаниям РФП 211-At, который является перспективным кандидатом для замены применяемых в настоящее время в радионуклидной йодотерапии РФП на основе ${}^{131}\text{I}$
- Продолжить исследования возможности получения медицинских радионуклидов фотоядерным методом в количестве, достаточном для медицинского применения.

Основные полученные результаты десятого этапа НИР.

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

- В рамках дисперсионной оптической модели выполнены расчеты эволюции нейтронных одночастичных спектров изотонов с числом нейтронов $N = 32$ и 34 в области $16 \leq Z \leq 32$. Показано, что в магических изотонах с $N = 32$ и 34 достигается минимум отличия энергии Ферми от полусуммы расчетных энергий последнего преимущественно заполненного и первого преимущественно свободного состояний. Эта особенность может служить маркером для кандидатов в новые магические ядра. Вычисленный среднеквадратичный радиус нейтронного галоподобного состояния $2p_{3/2}$ в дважды магическом ядре ${}^{52}\text{Ca}$ превысил радиус нижележащего состояния $1f_{7/2}$ на 0.8 Фм, что согласуется с недавними экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями. Вычислены одночастичные энергии нейтронно – и протонно – избыточных изотонов с новыми магическими числами $N = 14, 16$ и зеркальных ядер вблизи ${}^{48}\text{Ni}$ в дисперсионной оптической модели. Прослежена эволюция в предсказаниях магических свойств чисел $N = 14, 16$. Исследована зависимость разности энергий нейтронных и протонных состояний в зеркальных ядрах от орбитального момента. Результаты опубликованы.

- Продолжена работа по систематизации и анализу данных экспериментальных и теоретических исследований экзотических изобар – аналоговых состояниях (ИАС) легких ядер с $A = 6, 12, 13, 14, 20$ на основе единой концепции изотопической инвариантности. Подтверждено существование нейтронного гало в состоянии $(1/2)^+$ с энергией 3,09 МэВ ядра ^{13}C и имеется существенное указание на наличие протонного гало в состоянии 2.37 МэВ ядра ^{13}N . Сделан вывод, что ядра ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N в ИАС 1^- с энергией 2.62, 17.23 и 1.80 МэВ, соответственно, обладают однонуклонной (нейтронной или протонной) структурой гало, а ИАС 2^- с энергией 1.67, 16.57 и 1.19 МэВ для ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N , соответственно, могут рассматриваться как кандидаты в состояния с однонуклонным гало. Нейтронное гало подтверждено для состояния 6.09 МэВ ядра ^{14}C . Показаны признаки протонного гало в состоянии 8.06 МэВ ядра ^{14}N . Получено, что для состояний полосы $K = 0_1^+$ среднеквадратичный радиус увеличен на $\sim 20\%$ по сравнению с основным состоянием. Эти результаты подтверждают, что явление гало проявляется не только в основных состояниях экзотических ядер, но и в возбужденных состояниях обычных легких ядер. Результаты опубликованы.

- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер в реакциях $A(\alpha, y)^{16}\text{O}(3^-)$ на основе измеренных экспериментально на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ функций угловых $y\gamma$ – корреляций в различных плоскостях вылета γ – квантов. Проведен анализ экспериментальных результатов по исследованию структуры малонуклонных систем, полученных в наиболее полных кинематических условиях.

Исследована угловая зависимость выстроенностей ядра $^{16}\text{O}(3^-, 6.13)$, образованного в реакциях $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}(3^-)$ при энергии α -частиц 30.3 МэВ. Установлено, что механизмы образования ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ существенно влияют на его ориентационные характеристики. Максимальные по амплитуде выстроенности ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ в обеих реакциях наблюдаются в той области углов вылета конечных частиц, в которой основной вклад вносят прямые механизмы. При этих углах рассчитанные выстроенности удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

Проведен анализ пространственной конфигурации ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$ при последовательном заполнении ядра ^{16}O нейтронами 1d-оболочки. С этой целью рассмотрена реакция $^{18}\text{O}(t, p)^{20}\text{O}(g.s.)$ с использованием механизмов передачи динейтрона и последовательной передачи двух нейтронов с образованием в промежуточном состоянии ядра $^{19}\text{O}(5/2^+)$. Для учета этих механизмов рассчитаны необходимые спектроскопические амплитуды реакции в оболочечной модели с учетом деформации (схема Нильссона), что позволило определить структуру нейтронной периферии ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$. Результаты опубликованы.

- Продолжены работы по исследованию структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Эксперименты выполнены на ускорителе У-120 в НИИЯФ МГУ для реакции $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при энергии дейтронов 15,3 МэВ. Рассмотрен метод определения энергии синглетного квазисвязанного pp - состояния и получено пред-

варительное значение энергии виртуального pp - синглета: $E_{pp} \approx 400 \pm 90$ кэВ. Результаты опубликованы.

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 гипوماгнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.

Изучены биологические эффекты, индуцированные воздействием гипوماгнитного условий (ГМУ), на модели микроорганизмов рода *Bacillus*. Показано влияние ГМУ на характер роста бактериальной популяции и морфологическую структуру прокариотических клеток

Исследовано влияние ГМУ на жизнеспособность и характеристики роста микроскопических грибов. Полученные результаты указывают на отсутствии значимых эффектов на жизнеспособность грибов при воздействии ГМУ до 45 нТл. В то же время интенсивность роста микромицетов в ряде случаев заметно стимулировалась на поверхности образцов материалов в ГМУ. Возможно, развитие грибов на будущих лунных объектах может повысить вероятность технических и медицинских рисков. Результаты опубликованы.

- Исследовалось влияние диеты на тропность щитовидной железы к РФП 211-At. Обнаружено, что концентрация 211-At во всех критических органах (печень, почки, легкие, желудок, мозг и т. д.), кроме щитовидной железы, практически не зависит от диеты. А вот для щитовидной железы безйодовая диета повышает концентрацию радионуклида ^{211}At в несколько раз. Результаты опубликованы.
- Исследована возможность получения медицинского радионуклида ^{166}Ho фотоядерным методом. Выход образования ^{166}Ho составил в условиях эксперимента $3,6 \cdot 10^4 \text{ Bq}/(A \cdot h \cdot g/cm^2)$. Также определены выходы других радиоизотопов гольмия и эрбия. Показано, что фотоядерный метод может быть применен для получения ^{166}Ho в количестве, достаточном для медицинского применения.

Определения, обозначения и сокращения.

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

ДОМ — дисперсионная оптическая модель,

ИАС — изобар - аналоговые состояния ядер.

R_m — среднеквадратичный радиус ядра

ГМУ — гипوماгнитные условия

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 десятого этапа НИР был следующим :

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

- Провести анализ в рамках дисперсионной оптической модели магических свойств, оценку радиусов нейтронных орбит $1f_{7/2}$, $2p_{3/2}$ и галоподобной структуры в ядрах 52,54 . Исследовать эволюцию магических свойств чисел $N = 14, 16$ в изотонах. Исследовать зависимость разности энергий нейтронных и протонных состояний в зеркальных ядрах вблизи ^{48}Ni
- В совместной работе с коллегами из НИЦ «Курчатовский Институт», НИЯУ МИФИ и ОИЯИ предполагалось продолжение работы по систематизации данных экспериментальных и теоретических исследований экзотических изобар – аналоговых состояниях (ИАС) легких ядер (подготовка обзорной статьи), а также проведение исследований ИАС ядер с $A = 6$ и 12 на основе теоретического анализа новых экспериментальных данных по упругому рассеянию и реакциям передачи нуклонов с использованием различных моделей формфактора реакций, позволяющих получить информацию о распределении материи в исследуемых состояниях.
- Продолжить исследования ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер с целью исследования структуры малонуклонных систем, путём анализа экспериментальных данных, измеренных в наиболее полных кинематических условиях на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ.

- Совместно с лабораторией атомного ядра ИЯИ РАН (в рамках соответствующего Договора о научном сотрудничестве) продолжить изучение протон – протонных корреляций в реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow n + p + p$ на циклотроне У-120 при энергии дейтронов 15 МэВ.

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 гипوماгнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.
- Продолжить исследования по синтезу и биологическим испытаниям радиофармацевтического препарат (РФП) 211-At, который является перспективным кандидатом для замены применяемых в настоящее время в радионуклидной йодотерапии РФП на основе 131-I
- Продолжить исследования возможности получения медицинских радионуклидов фотоядерным методом в количестве, достаточном для медицинского применения.

Основные полученные результаты десятого этапа НИР .

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

- В рамках дисперсионной оптической модели выполнены расчеты эволюции нейтронных одночастичных спектров изотонов с числом нейтронов $N = 32$ и 34 в области $16 \leq Z \leq 32$. Показано, что в магических изотонах с $N = 32$ и 34 достигается минимум отличия энергии Ферми от полусуммы расчетных энергий последнего преимущественно заполненного и первого преимущественно свободного состояний. Эта особенность может служить маркером для кандидатов в новые магические ядра. Вычисленный среднеквадратичный радиус нейтронного галоподобного состояния $2p_{3/2}$ в дважды магическом ядре ${}^{52}\text{Ca}$ превысил радиус нижележащего состояния $1f_{7/2}$ на 0.8 Фм, что согласуется с недавними экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями. Вычислены одночастичные энергии нейтронно – и протонно – избыточных изотонов с новыми магическими числами $N = 14, 16$ и зеркальных ядер вблизи ${}^{48}\text{Ni}$ в дисперсионной оптической модели. Прослежена эволюция в предсказаниях магических свойств чисел $N = 14, 16$. Исследована зависимость разности энергий нейтронных и протонных состояний в зеркальных ядрах от орбитального момента. Результаты опубликованы.
- Продолжена работа по систематизации и анализу данных экспериментальных и теоретических исследований экзотических изобар – аналоговых состояниях (ИАС) легких ядер с $A = 6, 12, 13, 14, 20$ на основе единой концепции изотопической инвариантности. Подтверждено существование нейтронного гало в состоянии $(1/2)^+$ с энергией 3,09 МэВ ядра ${}^{13}\text{C}$ и имеется существенное указание на наличие протонного гало

в состоянии 2.37 МэВ ядра ^{13}N . Сделан вывод, что ядра ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N в ИАС 1^- с энергией 2.62, 17.23 и 1.80 МэВ, соответственно, обладают однонуклонной (нейтронной или протонной) структурой гало, а ИАС 2^- с энергией 1.67, 16.57 и 1.19 МэВ для ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N , соответственно, могут рассматриваться как кандидаты в состояния с однонуклонным гало. Нейтронное гало подтверждено для состояния 6.09 МэВ ядра ^{14}C . Показаны признаки протонного гало в состоянии 8.06 МэВ ядра ^{14}N . Получено, что для состояний полосы $K = 0_1^+$ среднеквадратичный радиус увеличен на $\sim 20\%$ по сравнению с основным состоянием. Эти результаты подтверждают, что явление гало проявляется не только в основных состояниях экзотических ядер, но и в возбужденных состояниях обычных легких ядер. Результаты опубликованы.

- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер в реакциях $A(\alpha, y)^{16}\text{O}(3^-)$ на основе измеренных экспериментально на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ функций угловых $y\gamma$ -корреляций в различных плоскостях вылета γ -квантов. Проведен анализ экспериментальных результатов по исследованию структуры малонуклонных систем, полученных в наиболее полных кинематических условиях.

Исследована угловая зависимость выстроенностей ядра $^{16}\text{O}(3^-, 6.13)$, образованного в реакциях $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}(3^-)$ при энергии α -частиц 30.3 МэВ.

Установлено, что механизмы образования ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ существенно влияют на его ориентационные характеристики. Максимальные по амплитуде выстроенности ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ в обеих реакциях наблюдаются в той области углов вылета конечных частиц, в которой основной вклад вносят прямые механизмы. При этих углах рассчитанные выстроенности удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

Проведен анализ пространственной конфигурации ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$ при последовательном заполнении ядра ^{16}O нейтронами 1d-оболочки. С этой целью рассмотрена реакция $^{18}\text{O}(t, p)^{20}\text{O}(g.s.)$ с использованием механизмов передачи динейтрона и последовательной передачи двух нейтронов с образованием в промежуточном состоянии ядра $^{19}\text{O}(5/2^+)$. Для учета этих механизмов рассчитаны необходимые спектроскопические амплитуды реакции в оболочечной модели с учетом деформации (схема Нильссона), что позволило определить структуру нейтронной периферии ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$. Результаты опубликованы.

- Продолжены работы по исследованию структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Эксперименты выполнены на ускорителе У-120 в НИИЯФ МГУ для реакции $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при энергии дейтронов 15,3 МэВ. Рассмотрен метод определения энергии синглетного квазисвязанного pp -состояния и получено предварительное значение энергии виртуального pp -синглета: $E_{pp} \approx 400 \pm 90$ кэВ. Результаты опубликованы.

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 гипомангнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.

Изучены биологические эффекты, индуцированные воздействием гипомангнитного условий (ГМУ), на модели микроорганизмов рода *Bacillus*. Показано влияние ГМУ на характер роста бактериальной популяции и морфологическую структуру прокариотических клеток

Исследовано влияние ГМУ на жизнеспособность и характеристики роста микроскопических грибов. Полученные результаты указывают на отсутствии значимых эффектов на жизнеспособность грибов при воздействии ГМУ до 45 нТл. В то же время интенсивность роста микромицетов в ряде случаев заметно стимулировалась на поверхности образцов материалов в ГМУ. Возможно, развитие грибов на будущих лунных объектах может повысить вероятность технических и медицинских рисков. Результаты опубликованы.

- Исследовалось влияние диеты на тропность щитовидной железы к РФП 211-At. Обнаружено, что концентрация 211-At во всех критических органах (печень, почки, легкие, желудок, мозг и т. д.), кроме щитовидной железы, практически не зависит от диеты. А вот для щитовидной железы безйодовая диета повышает концентрацию радионуклида ^{211}At в несколько раз. Результаты опубликованы.
- Исследована возможность получения медицинского радионуклида ^{166}Ho фотоядерным методом. Выход образования ^{166}Ho составил в условиях эксперимента $3,6 \cdot 10^4 \text{ Bq}/(\text{A} \cdot \text{h} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)$. Также определены выходы других радиоизотопов гольмия и эрбия. Показано, что фотоядерный метод может быть применен для получения ^{166}Ho в количестве, достаточном для медицинского применения.

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

В отчетный период выполнены расчеты эволюции нейтронных одночастичных спектров изотонов с числом нейтронов $N = 32$ и 34 в области $16 \leq Z \leq 32$ в дисперсионной оптической модели. Показано, что в магических изотонах с $N = 32$ и 34 достигается минимум отличия энергии Ферми от полусуммы расчетных энергий последнего преимущественно заполненного и первого преимущественно свободного состояний. Эта особенность может служить маркером для кандидатов в новые магические ядра. Вычисленный среднеквадратичный радиус нейтронного галоподобного состояния $2p_{3/2}$ в дважды магическом ядре ^{52}Ca превысил радиус нижележащего состояния $1f_{7/2}$ на 0.8 Фм. Это согласуется с недавними экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями, объясняющими «неожиданно» большой среднеквадратичный зарядовый радиус этого ядра за счет расширения распределения протонов, как-бы следующих за нейтронами.

Вычислены одночастичные энергии нейтронно- и протонно- избыточных изотонов с новыми магическими числами $N = 14, 16$ и зеркальных ядер вблизи ^{48}Ni в дисперсионной оптической модели. Прослежена эволюция в предсказаниях магических свойств чисел $N = 14, 16$. Исследована зависимость разности энергий нейтронных и протонных состояний в зеркальных ядрах от орбитального момента. Результаты опубликованы в [1-3]

В совместной работе с коллегами из НИЦ «Курчатовский Институт», НИ-ЯУ МИФИ и ОИЯИ на основе единой концепции изотопической инвариантности была продолжена работа по систематизации и анализу данных экспериментальных и теоретических исследований экзотических изобар - аналоговых состояниях (ИАС) легких ядер с $A = 6, 12, 13, 14, 20$. По результатам работы опубликован обзор в журнале «Физика элементарных частиц и атомного ядра» (ЭЧАЯ) [4]. В обзоре дано описание экспериментальных данных, теоретических методов и результатов анализа, представленных в литературе и базах ядерных данных, на основе которых получена в том числе новая информация о нейтронных и протонных гало в ИАС в легких ядрах, о распределении материи и радиусах ядер в исследуемых состояниях. В частности, подтверждено существование нейтронного гало в состоянии $(1/2)^+$ с энергией 3.09 МэВ ядра ^{13}C и имеется существенное указание на наличие протонного гало в состоянии 2.37 МэВ ядра ^{13}N . Сделан вывод, что ядра ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N в ИАС 1^- с энергией $2.62, 17.23$ и 1.80 МэВ, соответственно, обладают однонуклонной (нейтронной или протонной) структурой гало, а ИАС 2^- с энергией $1.67, 16.57$ и 1.19 МэВ для ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N , соответственно, могут рассматриваться как кандидаты в состояния с однонуклонным гало. Нейтронное гало подтверждено для состояния 6.09 МэВ ядра ^{14}C . Показаны признаки протонного гало в состоянии 8.06 МэВ ядра ^{14}N . Эти результаты подтверждают, что явление гало проявляется не только в основных состояниях экзотических ядер, но и в возбужденных состояниях обычных легких ядер.

В совместной работе с коллегами из НИЦ «Курчатовский Институт» и НИЯУ МИФИ в рамках Модифицированной дифракционной модели проведен анализ литературных данных по неупругому рассеянию альфа-частиц

на ^{20}N в области энергий 30-400 МэВ для низко – лежащих возбужденных состояний до 7 МэВ с переданными моментами L меньше 3. Получено, что для состояний полосы $K^\pi = 0_1^+$ среднеквадратичный радиус увеличен на $\sim 20\%$ по сравнению с основным состоянием. Результаты работы опубликованы в журнале «AIP Conference Proceedings» [5]

Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер в реакциях $A(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}(3^-)$ на основе измеренных экспериментально функций угловых $\gamma\gamma$ - корреляций в различных плоскостях вылета γ - квантов. Проведен анализ экспериментальных результатов по исследованию структуры малонуклонных систем, измеренных в наиболее полных кинематических условиях. Угловая зависимость выстроенностей ядра $^{16}\text{O}(3^-, 6.13)$, образованного в реакциях $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}(3^-)$ при энергии α -частиц 30.3 МэВ рассчитана с учетом механизмов реакций, определяющих сечение образование ядра $^{16}\text{O}(3^-)$, и сопоставлена с экспериментальными значениями выстроенностей, восстановленных из измеренных на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ функций угловых $\gamma\gamma$ -корреляций [6, 7, 8, 9]

Установлено, что механизмы образования ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ существенно влияют на его ориентационные характеристики. Максимальные по амплитуде выстроенности ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ в обеих реакциях наблюдаются в той области углов вылета конечных частиц, в которой основной вклад вносят прямые механизмы. При этих углах рассчитанные выстроенности удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

Проведен анализ пространственной конфигурация ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$ при последовательном заполнении ядра ^{16}O нейтронами 1d-оболочки. С этой целью рассмотрена реакция $^{18}\text{O}(t, p)^{20}\text{O}(g.s.)$ с использованием механизмов передачи динейтрона и последовательной передачи двух нейтронов с образованием в промежуточном состоянии ядра $^{19}\text{O}(5/2^+)$. Для учета этих механизмов рассчитаны необходимые спектроскопические амплитуды реакции в оболочечной модели с учетом деформации (схема Нильссона), что позволило определить структуру нейтронной периферии ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$.

Продолжены работы в рамках «Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и ИЯИ РАН» по исследованию структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Эксперименты выполнены на ускорителе У-120 в НИИЯФ МГУ для реакции $d+^1\text{H} \rightarrow p+p+n$ при энергии дейтронов 15,3 МэВ. Рассмотрен метод определения энергии синглетного квазисвязанного pp - состояния и получено предварительное значение энергии виртуального pp - синглета: $E_{pp} \approx 400 \pm 90$ кэВ [10, 11]. В работах [10, 11] представлены процедуры как получения экспериментальных данных по измерению длины pp - рассеяния, так и извлечения из них значения энергии протон-протонного состояния с использованием подгонки по минимуму χ^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 гипомангнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов [12, 13].

Изучены биологические эффекты, индуцированные воздействием гипомангнитных условий (ГМУ), на модели микроорганизмов рода *Bacillus*. Показано влияние ГМУ на характер роста бактериальной популяции и морфологическую структуру прокариотических клеток. Присутствие в питательной среде субингибирующих концентраций химического аналога ультрафиолета 4-NQO приводит к синергическому эффекту в ГМУ как в отношении особенностей микробного роста, так и в отношении наиболее выраженных морфологических преобразований [12].

Исследовано влияние ГМУ на жизнеспособность и характеристики роста микроскопических грибов. Полученные результаты указывают на отсутствии значимых эффектов на жизнеспособность грибов при воздействии ГМУ до 45 нТл. В то же время интенсивность роста микромицетов в ряде случаев заметно стимулировалась на поверхности образцов материалов в ГМУ. Возможно, развитие грибов на будущих лунных объектах может повысить вероятность технических и медицинских рисков [13]

Исследовалось влияние диеты на тропность щитовидной железы к РФП 211-At. Обнаружено, что концентрация РФП 211-At во всех критических органах (печень, почки, легкие, желудок, мозг и т. д.), кроме щитовидной железы, практически не зависит от диеты. А вот для щитовидной железы безйодовая диета повышает концентрацию радионуклида ^{211}At в несколько раз [14].

Исследована возможность получения медицинского радионуклида ^{166}Ho фотоядерным методом. Выход ^{166}Ho составил в условиях эксперимента $3,6 \cdot 10^4 \text{ Bq}/(\text{A} \cdot \text{h} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)$. Также определены выходы других радиоизотопов гольмия и эрбия. Показано, что фотоядерный метод может быть применен для получения ^{166}Ho в количестве, достаточном для медицинского применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- В рамках дисперсионной оптической модели выполнены расчеты эволюции нейтронных одночастичных спектров изотонов с числом нейтронов $N = 32$ и 34 в области $16 \leq Z \leq 32$. Показано, что в магических изотонах с $N = 32$ и 34 достигается минимум отличия энергии Ферми от полусуммы расчетных энергий последнего преимущественно заполненного и первого преимущественно свободного состояний. Эта особенность может служить маркером для кандидатов в новые магические ядра. Вычисленный среднеквадратичный радиус нейтронного галоподобного состояния $2p_{3/2}$ в дважды магическом ядре ^{52}Ca превысил радиус нижележащего состояния $1f_{7/2}$ на 0.8 Фм, что согласуется с недавними экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями. Вычислены одночастичные энергии нейтронно- и протонно-избыточных изотонов с новыми магическими числами $N = 14, 16$ и зеркальных ядер вблизи ^{48}Ni в дисперсионной оптической модели. Прослежена эволюция в предсказаниях магических свойств чисел $N = 14, 16$. Исследована зависимость разности энергий нейтронных и протонных состояний в зеркальных ядрах от орбитального момента. Результаты опубликованы в [1-3]
- Продолжена работа по систематизации и анализу данных экспериментальных и теоретических исследований экзотических изобар – аналоговых состояниях (ИАС) легких ядер с $A = 6, 12, 13, 14, 20$ на основе единой концепции изотопической инвариантности. Подтверждено существование нейтронного гало в состоянии $(1/2)^+$ с энергией 3.09 МэВ ядра ^{13}C и имеется существенное указание на наличие протонного гало в состоянии 2.37 МэВ ядра ^{13}N . Сделан вывод, что ядра ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N в ИАС 1^- с энергией $2.62, 17.23$ и 1.80 МэВ, соответственно, обладают однонуклонной (нейтронной или протонной) структурой гало, а ИАС 2^- с энергией $1.67, 16.57$ и 1.19 МэВ для ^{12}B , ^{12}C и ^{12}N , соответственно, могут рассматриваться как кандидаты в состояния с однонуклонным гало. Нейтронное гало подтверждено для состояния 6.09 МэВ ядра ^{14}C . Показаны признаки протонного гало в состоянии 8.06 МэВ ядра ^{14}N . Получено, что для состояний полосы $K = 0_1^+$ среднеквадратичный радиус увеличен на $\sim 20\%$ по сравнению с основным состоянием. Эти результаты подтверждают, что явление гало проявляется не только в основных состояниях экзотических ядер, но и в возбужденных состояниях обычных легких ядер. [4 – 5]
- Продолжено исследование ориентационных характеристик возбужденных состояний легких ядер в реакциях $A(\alpha, y)^{16}\text{O}(3^-)$ на основе измеренных экспериментально на ускорителе У-120 НИИЯФ МГУ функций угловых $y\gamma$ -корреляций в различных плоскостях вылета γ -квантов. Проведен анализ экспериментальных результатов по исследованию структуры малонуклонных систем, полученных в наиболее полных кинематических условиях. Исследована угловая зависимость выстроенностей ядра $^{16}\text{O}(3^-, 6.13)$, образованного в реакциях $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}(3^-)$ при энергии α -частиц 30.3 МэВ.

Установлено, что механизмы образования ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ существенно влияют на его ориентационные характеристики. Максимальные по амплитуде выстроенности ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ в обеих реакциях наблюдаются в той области углов вылета конечных частиц, в которой основной вклад вносят прямые механизмы. При этих углах рассчитанные выстроенности удовлетворительно согласуются с экспериментальными [6, 7, 8, 9].

Проведен анализ пространственной конфигурации ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$ при последовательном заполнении ядра ^{16}O нейтронами 1d-оболочки. С этой целью рассмотрена реакция $^{18}\text{O}(t,p)^{20}\text{O}(g.s.)$ с использованием механизмов передачи динейтрона и последовательной передачи двух нейтронов с образованием в промежуточном состоянии ядра $^{19}\text{O}(5/2^+)$. Для учета этих механизмов рассчитаны необходимые спектроскопические амплитуды реакции в оболочечной модели с учетом деформации (схема Нильссона), что позволило определить структуру нейтронной периферии ядра $^{20}\text{O}(g.s.)$.

- Продолжены работы по исследованию структуры малонуклонных систем в реакциях, вызываемых заряженными частицами. Эксперименты выполнены на ускорителе У-120 в НИИЯФ МГУ для реакции $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$ при энергии дейтронов 15,3 МэВ. Рассмотрен метод определения энергии синглетного квазисвязанного pp -состояния и получено предварительное значение энергии виртуального pp -синглета: $E_{pp} \approx 400 \pm 90$ кэВ [10, 11].

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 гипомангнитной безопасностью дальних и длительных космических полетов.

Изучены биологические эффекты, индуцированные воздействием гипомангнитных условий (ГМУ), на модели микроорганизмов рода *Bacillus*. Показано влияние ГМУ на характер роста бактериальной популяции и морфологическую структуру прокариотических клеток [12].

Исследовано влияние ГМУ на жизнеспособность и характеристики роста микроскопических грибов. Полученные результаты указывают на отсутствии значимых эффектов на жизнеспособность грибов при воздействии ГМУ до 45 нТл. В то же время интенсивность роста микромицетов в ряде случаев заметно стимулировалась на поверхности образцов материалов в ГМУ. Возможно, развитие грибов на будущих лунных объектах может повысить вероятность технических и медицинских рисков [13].

- Исследовалось влияние диеты на тропность щитовидной железы к РФП 211-At. Обнаружено, что концентрация 211-At во всех критических органах (печень, почки, легкие, желудок, мозг и т. д.), кроме щитовидной железы, практически не зависит от диеты. А вот для щитовидной железы безйодовая диета повышает концентрацию радионуклида ^{211}At в несколько раз [14].

- Исследована возможность получения медицинского радионуклида ^{166}Ho фотоядерным методом. Выход образования ^{166}Ho составил в условиях эксперимента $3,6 \cdot 10^4 \text{ Bq}/(\text{A} \cdot \text{h} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)$. Также определены выходы других радиоизотопов гольмия и эрбия. Показано, что фотоядерный метод может быть применен для получения ^{166}Ho в количестве, достаточном для медицинского применения.

Список использованных источников

- 1 Беспалова О.В., Климочкина А.А. «Магичность, радиусы нейтронных орбит $1f_{7/2}$, $2p_{3/2}$ и галоподобная структура в ядрах $^{52,54}\text{Ca}$ ». Ядерная физика, 2024, том 87, № 2, с. 100-105. DOI: 10.31857/S0044002724020065 [Bespalova O.V., Klimochkina A.A. «The Magicity, the Radii of Neutron Orbits $1f_{7/2}$, $2p_{3/2}$ and Halo-Like Structure of $^{52,54}\text{Ca}$ Nuclei». Physics of Atomic Nuclei, 2024, V. 87, № 2, P. 105-111. DOI: 10.1134 / S 1 063 778 824 020 091.
- 2 Bepalova O., Klimochkina A., Mosunov M. «Evolution of neutron shell structure of $N = 14, 16$ isotones». LXXIV International Conference “Nucleus-2024: Fundamental problems and applications”, Dubna, July 1-5, 2024: Book of Abstracts [Electronic edition], JINR (Dubna), с. 84.
- 3 Klimochkina A., Ukolova E., Talibdjanoj J., Bepalova O. «Single-particle structure of mirror nuclei near ^{48}Ni ». LXXIV International Conference “Nucleus-2024: Fundamental problems and applications”, Dubna, July 1-5, 2024: Book of Abstracts [Electronic edition], JINR (Dubna), с. 91.
- 4 Демьянова А. С., Данилов А.Н., Дмитриев С.В., Старостин В. И., Гончаров С.А., Гуров Ю.Б., Исследование гало в изобар-аналоговых состояниях. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2024. т.55, вып.2. стр. 375–414 (PACS: 21.10.-k) Demyanova A. S., Danilov A. N., Dmitriev S. V., Starastsin V. I., Goncharov S. A., Gurov Yu. B., Investigation of Halos in Isobar Analog States. Physics of Particles and Nuclei, Vol. 55, No. 2, 2024, pp.233-255 (DOI: 10.1134/S1063779624020035)
- 5 Demyanova A. , Danilov A. , Starastsin V., Goncharov S., Leonova T., Search for states with enhanced radii in ^{20}Ne . AIP Conf. Proc., 2024, 3020, 020001, pp.1-6 (DOI: 10.1063/5.0193498)
- 6 Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Выстроенность ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ образованного в реакциях с участием альфа- частиц. В журнале Ядерная физика, издательство ФГБУ “Издательство “Наука” (Москва), 2024, том 87, № 3, с. 371-378.
- 7 Galanina L.I., Zelenskaya N.S., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. The Alignment of the $^{16}\text{O}(3^-)$ Nucleus Formed in Reactions with Alpha Particles. В журнале Physics of Atomic Nuclei, издательство Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 2024, том 87, № 3, с. 366-370. DOI 10.1134/S1063778824700066
- 8 Zelenskaya N.S., Galanina L.I., Lebedev V.M., Orlova N.V., Spassky A.V. The alignment of the $^{20}\text{Ne}(2^+; 1.63\text{MeV})$ formed in the reaction $^{19}\text{F}(\alpha, t)^{20}\text{Ne}$ at $E_\alpha = 30.3\text{MeV}$. В сборнике LXXIV International conference «Nucleus-2024. Fundamental problems and applications». Dubna, Russia, 1-5 July 2024. Book of abstracts, место издания Joint institute for nuclear research Dubna, 2024, с. 298.
- 9 Зеленская Н.С. Выстроенность ядра $^{20}\text{Ne}(2^+; 1.63\text{MeV})$, образованного в реакции $^{19}\text{F}(\alpha, t)^{20}\text{Ne}$. LXXIV International conference «Nucleus-2024. Fundamental problems and applications». Dubna, Russia, 1-5 July 2024.

Book of abstracts, место издания Joint institute for nuclear research Dubna, 2024, с. 298.

- 10 Kasparov A.A., Mordovskoy M.V., Mitsuk V.V., Lebedev V.M., Spassky A.V. Simulation and Analyzing Preliminary Data from an Experiment to Study Proton-Proton Correlations in the $d + {}^1H \rightarrow p + p + n$ Reaction. в журнале Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, издательство Allerton Press Inc. (United States), 2024, том 88, № 11, с. 1789-1793. DOI 10.1134/S1062873824708262
- 11 Мицук В., Каспаров А., Мордовской М., Лебедев В., Спасский А. Определение низкоэнергетических параметров pp-состояния в реакции $d + {}^1H \rightarrow p + p + n$ в сборнике LXXIV International conference «Nucleus-2024. Fundamental problems and applications». Dubna, Russia, 1-5 July 2024. Book of abstracts, место издания Joint institute for nuclear research Dubna, 2024, с. 128.
- 12 Фиалкина С.В., Осипова П.Д., Васин А.Л., Лебедев В.М., Спасский А.В., Буравков С.В., Поддубко С.В., Орлов О.И. Влияние гипوماгнитного поля на характер роста и морфологию клеток бактерий рода *Bacillus*. в журнале Авиакосмическая и экологическая медицина, издательство Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем РАН (Москва), 2024, том 58, № 5, с. 89-99. DOI 10.21687/0233-528X-2024-58-5-89-99
- 13 Родимин В.Д., Харин С.А., Поддубко С.В., Кураков А.В., Кулачкова С.А., Ярмеева М.М., Лебедев В.М., Спасский А.В. Развитие микроскопических грибов в гипوماгнитных условиях, свойственных Луне и окололунному пространству. В сборнике Современная микология в России, место издания Национальная академия микологии, Москва, 2024, том 10, с. 163-165. DOI 10.14427/cmr.2024.x.04
- 14 Юминов О.А. , Бондаренко Д.А. , Дроздов В.А. , Еременко Д.О., Мурашев А.Н. , Платонов С.Ю., Фотина О.В. Изучение фармакокинетики ${}^{211}\text{At}$ Успехи Молекулярной Онкологии (Advances in Molecular Oncology) , место издания ООО «ИД «АБВ-пресс» 115478 Москва, Каширское шоссе, 24, стр. 15. 2024, Том 11. № 4. Приложение. Стр. 137-138

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2024 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами