



«ЯДРО-2026»

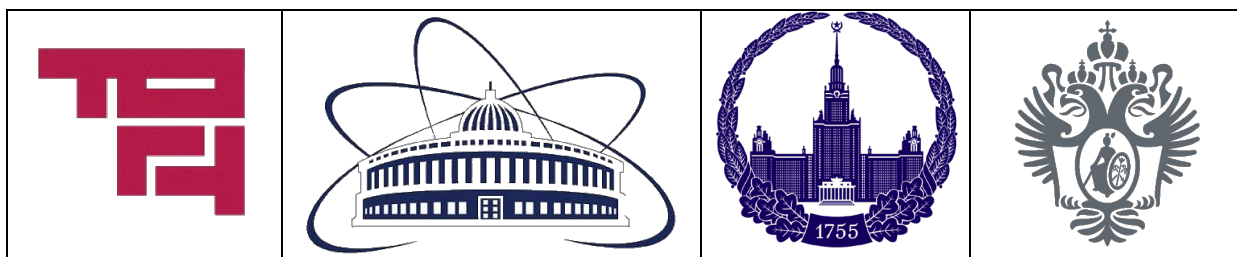
**Физика атомного ядра
и элементарных частиц.
Ядерно-физические технологии**



**Хабаровск
2026**

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Danilovsky Pacific National University
Joint Institute for Nuclear Research
Lomonosov Moscow State University
Saint Petersburg State University



«NUCLEUS-2026»

**PHYSICS OF ATOMIC NUCLEUS
AND ELEMENTARY PARTICLE.
NUCLEAR PHYSICS TECHNOLOGIES**

**ABSTRACTS OF REPORTS
LXXVI INTERNATIONAL CONFERENCE**

September 21–26, 2026 y.

Khabarovsk
Publishing house PNU
2026

ISBN 978-5-7389-4263-1

© Pacific national university, 2026
© The team of authors, 2026

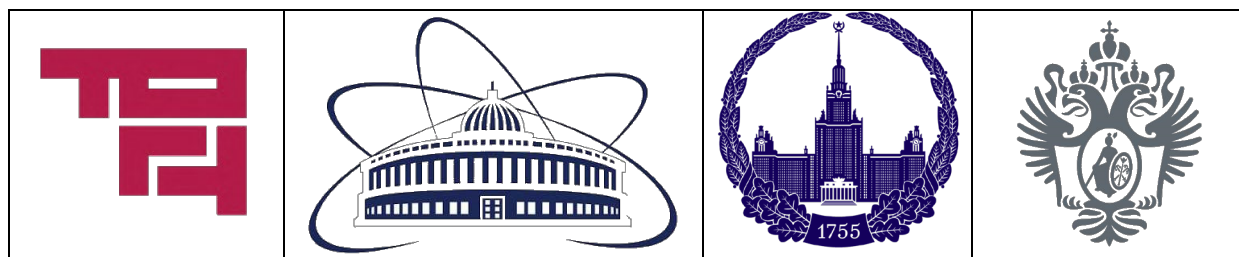
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Тихоокеанский государственный университет имени М. П. Даниловского

Объединенный институт ядерных исследований

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Санкт-Петербургский государственный университет



«ЯДРО-2026»

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
LXXVI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

21–26 сентября 2026 г.

Хабаровск
Издательство ТОГУ
2026

ISBN 978-5-7389-4263-1

© Тихоокеанский государственный
университет, 2026

© Коллектив авторов, 2026

УДК 539.1(063)
ББК В38я431
Я378

Организаторы:

Тихоокеанский государственный университет имени М. П. Даниловского, Хабаровск
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Редколлегия:

Ю. С. Марфин (председатель, ТОГУ)
А. И. Мазур (сопредседатель, ТОГУ)
Е. А. Колганова (сопредседатель, ОИЯИ)
Т. Ю. Третьякова (сопредседатель, МГУ)
В. И. Жеребчевский (сопредседатель, СПбГУ)
К. А. Драчёв (научный секретарь, ТОГУ)

«Ядро – 2026». Физика атомного ядра и элементарных частиц.
Я378 Ядерно-физические технологии : тезисы докладов LXXVI
Международной конференции (21–26 сентября 2026 г.) / Министерство
науки и высшего образования Российской Федерации, Тихоокеанский
государственный университет имени М. П. Даниловского ; редакционная
коллегия: Ю. С. Марфин (ответственный редактор) [и др.]. – Хабаровск :
Издательство ТОГУ, 2026. – Текст : электронный. – 271, [1] с. – URL:
<https://togudv.ru/ru/library/elektronnye-izdaniya/collections/> – Дата
публикации: 27.07.2026. – ISBN 978-5-7389-4263-1.

В издании опубликованы тезисы участников LXXVI Международной конференции
«Ядро – 2026. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические
технологии», проходящей в Тихоокеанском государственном университете имени
М. П. Даниловского 21–26 сентября 2026 г.

УДК 539.1(063)
ББК В38я431

Является самостоятельным электронным изданием.

Минимальные системные требования: 1) браузер Google Chrome; 2) скорость
подключения к сети Интернет – 1 Мбит/с и выше.

ISBN-978-5-7389-4263-1

© Тихоокеанский государственный
университет, 2026
© Коллектив авторов, 2026

Пленарные доклады

Plenary talks

Physics opportunities for the fixed-target experiment at the Nuclotron with the SRC detector setup

A. Aparin, M. Patsyuk

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: aparin@jinr.ru

In this report we discuss some possible experimental studies at a fixed target setup at the NICA collider complex at Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia). NICA can provide a unique variety of beams of light to heavy nuclei with energies of a few GeV/nucleon. Additionally, there is a possibility to have polarized beams of protons and deuterons.

One of the existing projects is aimed at Short-Range Correlations (SRC) studies. SRC are formed when the wave functions of two nucleons partly overlap. In this very short-lived configuration, the momenta of the pairing nucleons are opposite in space and higher than the Fermi Sea level. The JINR SRC physics program complements the world-wide efforts of the SRC studies. The first two SRC measurements at JINR took place 2018 and 2022 and used hard quasi-elastic scattering reactions $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}/^{10}\text{B}/^{10}\text{Be}$ registered using a modified BM@N spectrometer. The key feature of the setup is a dedicated two-arm spectrometer aimed at measurements of trajectories and momenta of the two final state protons. The next SRC experiment at the new experimental area will measure a hard quasi-elastic $d(p, 2p)$ scattering reaction using tensor-polarized deuteron beams, a liquid hydrogen target, and a similar two-arm spectrometer consisting of trigger, coordinate, and time-of-flight detectors. Considering the SRC setup as a starting point, we discuss other physics topics of potential interest like strange particle production near the threshold, search for the nuclear modification in small systems, test of isospin symmetry in nucleus-nucleus collisions. Estimates of reaction kinematics are done for some of the listed reactions with the discussion of necessary detector upgrades.

We demonstrate that the physics program of the NICA complex can be enriched by studies of particle production close to the boundary kinematics and experiments accessing moderate-to-high values of the parton momentum fraction x , which can be particularly sensitive to the effects of cold QCD.

Коллаборация FLAP: задачи и перспективы

А. А. Балдин

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

e-mail: an.baldin@mail.ru

Излагаются основные направления исследований с пучками релятивистских частиц в рамках международной коллаборации FLAP (Fundamental & applied Linear Accelerator Physics). Дан обзор выполненных и планируемых работ в ОИЯИ с пучками линейных электронных ускорителей ЛИНАК-200 и микротрон МТ-25, а также выведенными пучками релятивистских ядер ускорительного комплекса NICA.

Обсуждаются экспериментальные результаты и особенности генерации диффракционного Черенковского, терагерцового, переходного излучения с использованием функциональных материалов. Описываются методы измерений и используемые детекторные системы. Представлена методика измерения когерентного переходного излучения с высоким спектральным разрешением, позволяющая восстанавливать продольную структуру ускоренных пучков заряженных частиц с длительностью банчей от десятков фемтосекунд до десятков пикосекунд. Обсуждаются вопросы прикладных исследований на пучках электронов, включая эксперименты по генерации вторичных нейтронов и тестированию детекторов и электроники.

Эксперименты на пучках фотонов: проблемы и перспективы

В. В. Варламов*, А. И. Давыдов, В. Н. Орлин

Институт ядерной физики имени Д. В. Скобелевца
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
*e-mail: vvvarlamov@gmail.com

Большинство данных о взаимодействиях γ -квантов с атомными ядрами, прежде всего, о широко востребованных сечениях фотонейтронных реакций, получено в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов и тормозного γ -излучения [1]. По измеряемой энергетической зависимости выхода реакции $Y(E^M)$ – интеграла от произведения сечения реакции $\sigma(E)$ и непрерывного энергетического спектра фотонов $W(E^M, E)$ с верхней границей E^M – эксперименты идентичны, но по методам получения информации о сечении кардинально различаются. На пучках аннигиляционных фотонов сечение $\sigma(E^M) = Y_{e^+}(E^M) - Y_{e^-}(E^M)$ идентифицируется как разность выходов, измеренных на пучках позитронов и электронов, чем исключается влияние спектров фотонов W_{e^+} и W_{e^-} . С помощью метода разделения нейтронов по множественности определяются сечения разных парциальных реакций (подход – «от парциальных реакций к полным»). На пучках тормозного γ -излучения влияние спектра W_{e^-} исключается путем математического решения обратной задачи восстановления сечения $\sigma(E)$ из выхода $Y(E^M)$. При этом реализуется альтернативный подход «от полной реакции к парциальным»: в сечение выхода нейтронов $\sigma(E) = \sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n)$ вносятся поправки на их множественность, рассчитанные по статистической теории, и определяются сечения других реакций. Установлено [2, 3], что сечения реакций, полученные в экспериментах обоего типа, существенно различаются и во многих случаях не удовлетворяют физическим критериям достоверности [4]. С помощью экспериментально-теоретического метода оценки, основанного на физических критериях, получены (во многих случаях впервые) новые достоверные сечения различных реакций для большого количества ядер [2–5]. Показано, что основными причинами существенных расхождений между оцененными и экспериментальными сечениями реакций являются различные систематические погрешности прямых методов получения информации о них в экспериментах обоего типа. Обоснована необходимость использования активационных методов для прямого разделения многонуклонных реакций и получения их достоверных сечений. Показано, что такие методы могут быть эффективно реализованы на пучках фотонов обратного комптоновского рассеяния, свободных от основных недостатков использованных ранее фотонных пучков [5].

Список источников

1. IAEA NDS Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). URL: <https://nds.iaea.org/exfor/>.
2. Varlamov V. V., Davydov A. I., Orlin V. N. Atom. Data and Nucl. Data Tables, **161**, 101697 (2025).
3. Варламов В. В., Давыдов А. И., Орлин В. Н., Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. **78**(3), 2330206 (2023).
4. Варламов В. В., Ишханов Б. С., Орлин В. Н., Четверткова В. А. Изв. РАН Сер. физ. **74**, 875 (2010).
5. Варламов В. В., Давыдов А. И. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. **79**(2), 2420201 (2024).

Международный центр нейтронных исследований на базе реактора ПИК

В. В. Воронин

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

e-mail: Voronin_VV@pnpi.nrcki.ru

Будет представлен текущий статус по созданию Международного центра нейтронных исследований на основе исследовательского реактора ПИК (НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Гатчина), который станет самым мощным источником при работе на выведенных пучках тепловых нейтронов.

Реактор ПИК (пучковый исследовательский корпусной) представляет собой источник нейтронов с рекордными параметрами, призванный стать флагманом нейтронных исследований в России. Он представляет собой водо-водяной корпусной реактор, где легкая вода (H_2O) используется как теплоноситель, а тяжелая вода (D_2O) как отражатель и замедлитель нейтронов. Плотность потока тепловых нейтронов в отражателе до $1,2 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2\text{с}$.

Для вывода нейтронного излучения из отражателя реактор ПИК снабжен значительным числом экспериментальных каналов.

В настоящее время реактор ПИК выведен на энергетический режим работы, в марте 2022г. достигнута тепловая мощность 7 МВт. Введены в эксплуатацию первые 5 станций нейтронного рассеяния, проведены первые эксперименты.

С 2020 г реализуется полномасштабная программа создания приборного парка для проведения экспериментальных исследований на выведенных пучках нейтронов. В конце 2026 года, в соответствии с Указом Президента от 25 июня 2019 г. № 356 (ред. от 12.03.2026), будет осуществлён ввод в эксплуатацию 20 станций различного назначения.

Стенд для исследования световыхода органических сцинтилляторов: результаты эксперимента с генератором DT-нейтронов

В. В. Гаганов^{1*}, И. С. Вершинин¹, А. В. Долгополов^{1,2}

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

²Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Саров, Россия

*e-mail: gaganov@expd.vniief.ru

Детекторы на основе органических сцинтилляторов являются эффективным измерительным инструментом во многих современных экспериментах. Они характеризуются коротким временем высвечивания, высокой радиационной стойкостью, отсутствием значимых ограничений на размеры сцинтиллятора, надёжностью в эксплуатации. Одной из важнейших характеристик сцинтиллятора является световыход. В ходе данной работы был создан стенд для исследования зависимости световыхода органических сцинтилляторов от энергии электронов и протонов. Основу измерительного стенда составляет схема совпадений с двумя сцинтилляционными детекторами [1]. Один из детекторов (анализирующий) размещается на оси пучка первичного излучения; второй (управляющий) размещается так, чтобы прямая, соединяющая центры двух сцинтилляторов, составляла заданный угол по отношению к направлению пучка первичного излучения. Анализирующий детектор регистрирует протоны отдачи, образованные в результате взаимодействия проходящего через него пучка DT-нейтронов. Управляющий детектор регистрирует нейтроны, рассеянные под заданным углом в сцинтилляторе анализирующего детектора. С помощью схемы совпадений отбираются импульсы, соответствующие только тем протонам отдачи, которые образуются в сцинтилляторе анализирующего детектора в результате рассеяния первичных нейтронов под заданным углом. В результате экспериментов с генератором DT-нейтронов, для сцинтиллятора на основе полистирола получена зависимость световыхода в диапазоне энергий протонов от 1 МэВ до 14 МэВ.

Список источников

1. Стенд для исследования световыхода сцинтилляционных детекторов : результаты эксперимента с источником гамма-квантов / И. С. Вершинин, В. В. Кулик, В. В. Гаганов [и др.] // Сборник докладов 18-й научно-технической конференции «Молодежь в науке». Саров. 187–193 (2020).

Quasimagic nuclei and pseudospin symmetry

R. V. Jolos*, E. A. Kolganova

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: jolos@theor.jinr.ru

The impetus for development of the shell model of nuclei was given by the experimental data indicating on specific properties of nuclei having magic numbers of protons and/or neutrons. The shell model is based on the idea of the self-consistent nuclear mean field and the spectra of the single-particle levels with characteristic gaps. Such gaps in the spectra of single-particle states for a number of reasons may occur not only at the classical magic numbers of nucleons. The well-known example is ^{146}Gd with the number of protons $Z=64$. The properties of this nucleus were intensively discussed in the 80s–90s. It turned out later, that the reason for the distinguished role of the proton number $Z=64$ is pseudospin symmetry in the spectra of single-particle states. The same symmetry is manifested in the properties of nuclei from the regions $Z=30\text{--}38$, $N=50$ and $Z=84\text{--}100$, $N=126$.

From the very beginning of the use of the shell model, a huge role was revealed that the neutron-proton interaction plays in the structure of nuclei. When studying the properties of nuclei far from the stability region, new magic numbers were discovered, the reason for their appearance is the n-p interaction.

This report is devoted to the discussion of these issues.

Программа исследований структуры нуклонов и атомных ядер
методом активной мишени

А. А. Дзюба^{1,2*}, А. Ю. Арутюнова¹, Н. В. Грузинский¹, А. В. Добровольский¹, П. И. Карпухина,
П. В. Кравченко¹, Е. М. Маев¹, О. Е. Маев¹, О. В. Миклухо¹, К. А. Родионов¹, А. А. Фетисов¹,
В. Д. Фотьев¹, А. Д. Чубыкин¹, А. Аламури²

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dzyuba_aa@pnpi.nrcki.ru

Активная мишень – это детектор, в основу которого положена время-проекционная камера. Эта установка одновременно является газовой мишенью для различных пучков частиц и детектором вторичных частиц (частиц отдачи). Достоинствами метода активной мишени являются: уникальная возможность измерения частиц малых энергий (0,5–40 МэВ), эффективность близкая к 100%, 4 π -геометрия, возможность определения угла вылета частицы отдачи, возможность проведения корреляционных измерений вместе с детекторами рассеянных частиц пучка. Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ обладает значительным научным заданием в области экспериментов с применением метода активной мишени [1], [2]. Здесь, в настоящее время на основе этого метода сформулирована и реализуется экспериментальная программа исследований структуры нуклонов и атомных ядер, которая включает: изучение реакций выбивания протонами (и другими частицами высоких энергий) кластеров из ядер [3], измерение электрической и магнитной поляризуемостей нуклона [4], измерение зарядового радиуса протона и форм-факторов, входящих в сечение упругого e^-p -рассеяния.

В ходе реализации этой программы уже разработаны и созданы три детектора, основанных на этом принципе, разработана и создана считывающая электроника, проведено моделирование отклика детекторов [5]. В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется подготовка к эксперименту на протонном пучке синхроциклотрона СЦ-1000, а также создается активная мишень, в газовый объем которой интегрирован детектор рассеянных частиц.

В докладе будет детально описан метод активной мишени, а также представлен краткий обзор результатов, достигнутых с его помощью, сформулированы физические задачи цикла исследований, показаны наработки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в этой области.

Список источников

1. J. P. Burq [et al.] Nucl. Phys. B **217**, 285 (1983).
2. Г. Д. Алхазов [и др.]. ЭЧАЯ **53**, вып. 3, 661 (2022).
3. Доклад Арутюновой А. М. на конференции ЯДРО-2026.
4. A.Yu. Arutyunova, A. A. Dzyuba, E. M. Maev, Phys. Part. Nuclei **57**, 434 (2026).
5. A. H. Alamouri, A. A. Dzyuba, Phys. Part. Nuclei **57**, 249 (2026).

Description of backbending in even Pu nuclei

A. D. Efimov^{1,2*}, I. V. Koval¹, I. N. Izosimov³

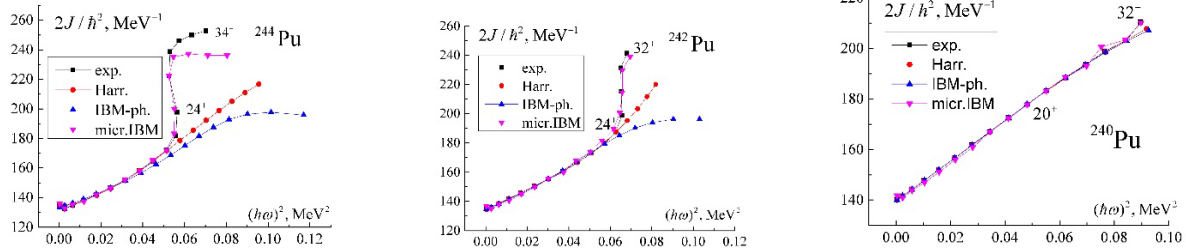
¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

²Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: efimov98@email.ru

For even–even nuclei in the actinide region, a clear backbending effect in the moment of inertia as a function of the square of the nuclear rotation frequency is observed only for two isotopes, $^{242,244}\text{Pu}$. For ^{240}Pu , a distinct influence of high-spin modes is manifested only in the last observed state with spin 32_1^+ . For ^{238}Pu , there is a small irregularity in the behavior of the moment of inertia, which can also be assumed to be related to high-spin modes. To test these assumptions, calculations were performed based on the microscopic or semimicroscopic version of the Interacting Boson Model (IBM) [1,2]. In this approach, the boson space is extended to include bosons with spin $J = 14^+$, and the parameters of the boson Hamiltonian are calculated on the basis of factorized internucleon forces. Due to the extreme sensitivity of the calculated energies to the parameters of the IBM Hamiltonian in the mass region under consideration, the boson parameters were slightly varied around their calculated values. It is in this sense that the present approach can be considered semimicroscopic for nuclei in the actinide region. Below, figures showing the moments of inertia are presented sequentially for $^{244,242,240}\text{Pu}$. For the first and second nuclei, a clear backbending is observed. For the third nucleus, it turned out to be very difficult to describe the situation with a sharp upbending. An assumption had to be made about a significant weakening of the coupling of collective states with quasiparticle pairs $(j_{15/2}j_{15/2})^{(12+,14+)}$, which is implemented in third-order perturbation theory.



In this case, the component of the states determined solely by the d -boson composition, i.e., the collective component, is found to be 47% and 38% for the states with spins 22_1^+ and 24_1^+ in ^{244}Pu , respectively. For ^{242}Pu , the corresponding values are 57% and 47% for the states with spins 24_1^+ and 26_1^+ , respectively. In ^{240}Pu , the collective component in the state with spin 32_1^+ is 75%. This leads to the suggestion that the backbending effect should not be expected in the lighter plutonium isotopes, whereas it might occur in ^{246}Pu .

References

1. A. D. Efimov, I. N. Izosimov Intern. J. Mod. Phys. E **34**, 2541004 (2025).
2. A. D. Efimov, I. N. Izosimov, I. V. Koval Nucl. Phys. A **1070**, 123370 (2026).

Ядерная физика и диагностика

В. И. Жеребчевский*, Н. А. Мальцев, Г. А. Феофилов, Д. А. Комарова, А. М. Кострыгина,
В. В. Петров, Н. А. Прокофьев, А. Скалецкий, С. Ю. Торилов, Е. О. Землин

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.zherebchevsky@spbu.ru

Современная ядерная физика, физика высоких энергий и элементарных частиц, ядерная медицина имеют в своём арсенале широкий спектр экспериментальных методик и различных ядерно-физических технологий. Большую роль здесь играют ускорители заряженных частиц, без которых не обходится практически ни один эксперимент в перечисленных областях. Главный фактор, влияющий на конечный результат всех исследований, состоит в умении точно определять начальные условия, базовые величины, или входные параметры, изучаемых ядерных процессов. К этим величинам могут относиться интенсивность и пространственное распределение частиц в пучках, выводимых из ускорителя, потери энергии и вторичные процессы при взаимодействии частиц пучка с различными материалами, зарядовое распределение продуктов сопутствующих ядерных реакций в зоне облучения.

В ядерной медицине одна из главных задач состоит в прецизионном определении места взаимодействия ионизирующих излучений с органами и тканями и, в особенности, с опухолевыми образованиями. Таким образом, возникает большая потребность в использовании разного рода мониторинговых приборов и диагностических детекторных комплексов для измерения характеристик пучков заряженных частиц и ядерных излучений, применяемых в соответствующих экспериментальных исследованиях.

В работе будет дан обзор детекторных технологий, направленных на решение указанных диагностических задач. Будут представлены ядерно-физические технологии, разрабатываемые в СПбГУ для решения диагностических задач в области ускорительной техники (мониторинг пучков заряженных частиц и тяжелых ионов в широком диапазоне их энергий), радиационного материаловедения (изучение процессов вторичной электронной эмиссии при взаимодействии пучков заряженных частиц и тяжелых ионов с различными материалами), новые методики в области позитронно-эмиссионной и протонной томографии. В работе будут также представлены результаты обширных экспериментальных исследований проведенных на различных ускорительных комплексах с протонами в диапазоне энергий от 2 МэВ и до 1000 МэВ, а также тяжелыми ионами от энергий 1.75 МэВ/нуклон и до энергий 1.6 ГэВ/нуклон.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Few-body systems with singular (zero-range) interactions: Some aspects of correct formulation and related problems

O. I. Kartavtsev

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
e-mail: oik@jinr.ru

The aim of the report is to discuss the description of few particles in the universal low-energy limit of zero-range two-body interactions.

Main attention is devoted to the problem of three (and more) two-component particles (fermions), its correct formulation and the energy spectrum in dependence on the mass ratio and the total angular momentum.

The correct formulation is also demonstrated for the Minlos-Faddeev regularization of the three-boson problem.

In relation to these problems, brief excursion to properties of the singular inverse square potential is given.

Spin Physics Detector (SPD) at the NICA collider: status and outlooks

Victor T. Kim

Petersburg Nuclear Physics Institute, NRC Kurchatov Institute, Gatchina, Russia
e-mail: victor.t.kim@gmail.com

On behalf of the SPD Collaboration

The Spin Physics Detector (SPD) is a universal detector at the NICA collider under commissioning at JINR, Dubna. The SPD is intended to study the spin structure of the proton and deuteron and other spin-related phenomena using a unique possibility to operate with polarized proton and deuteron beams at a collision energy up to 27 GeV and a luminosity up to $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. As the primary goal, the experiment aims to provide access to the gluon TMD PDFs in the proton and deuteron, as well as to the gluon transversity distribution and to tensor PDFs in the deuteron, via the measurements of specific single and double spin asymmetries using different complementary probes such as charmonia, open charm, and prompt photon production processes. Other polarized and unpolarized physics is possible, especially at the first stage of NICA operation with reduced luminosity and collision energy of the proton and ion beams. The physics program of the SPD and the design of the SPD setup will be presented.

Эффекты нарушения изотопической симметрии в ядерных столкновениях на SPS и NICA

В. Н. Коваленко*, Г. А. Феофилов, М. А. Жаров

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.kovalenko@spbu.ru

Доклад посвящен исследованию нарушения изоспиновой симметрии в релятивистских столкновениях ядер. Коллаборацией NA61/SHINE в ЦЕРН недавно были получены новые данные с большой статистикой для системы $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ при энергии 11,9 ГэВ, в которых обнаружено статистически значимое отклонение отношения выходов заряженных и нейтральных каонов $R_K=(K^++K^-)/(2K^0)$ от единицы на уровне $(18,4\pm 6,1)\%$. В совокупности с результатами других экспериментов этот результат соответствует значимости $4,7\sigma - 5,3\sigma$ сверх ожидаемых эффектов [1], и, таким образом, интерпретируется как проявление нарушения изоспиновой инвариантности на уровне рождения кварков.

В работе представлен обзор известных источников изоспиновой асимметрии: нуклонный состав ядер, различие масс u - и d -кварков [6], электромагнитные взаимодействия между каонами, вклады резонансных распадов [1], [2] и др. Показано, что совокупный вклад этих механизмов не превышает нескольких процентов и не способен объяснить наблюдаемое превышение.

Обсуждается новая теоретическая интерпретация, предложенная в [3] в рамках модели UrQMD [4], [5], основанная на параметризованном нарушении симметрии при разрыве струн: вероятность рождения uu -пар в три раза превышает вероятность рождения dd -пар ($P(u):P(d)=3:1$). Данная модификация успешно описывает данные по рождению каонов не только в $\text{Ar}+\text{Sc}$, но и в e^+e^- и pp -столкновениях.

Представлены результаты Монте-Карло моделирования в рамках стандартной и модифицированной версий генератора UrQMD для $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$, $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ столкновений, продемонстрировано преимущество симметричных систем для независимой проверки данного эффекта. Произведена оценка потенциала детектора MPD [6, 7] на коллайдере NICA для исследования данного явления в столкновениях $d+d$, $\text{Xe}+\text{Xe}$, $\text{Bi}+\text{Bi}$, $\text{Xe}+\text{W}$. Обсуждаются требования к статистике, разрешению по импульсу и идентификации частиц, а также возможные стратегии анализа данных для верификации нарушения изоспиновой симметрии в новых энергетических диапазонах.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 153212394.

Список источников

1. F. Giacosa [et al.]. (NA61/SHINE Collaboration). Nat. Commun. **16**, 2849 (2025).
2. W. Brylinski [et al.]. Acta Phys. Polon. B **57**, 3-A5 (2026), arXiv: 2312.07176 [nucl-th].
3. T. Reichert, J. Steinheimer, M. Bleicher. Phys. Lett. B **873**, 140170 (2026).
4. S. A. Bass [et al.]. Prog. Part. Nucl. Phys. **41**, 255 (1998).
5. M. Bleicher [et al.]. Phys. J. G **25**, 1859 (1999).
6. V. Abgaryan [et al.] (MPD Collaboration). Eur. Phys. J. A **58**, 140 (2022).
7. R. Abdulin [et al.] (MPD Collaboration). Rev. Mex. Fis. **71**, 041201 (2025).

Overview on progress in neutrino physics

L. D. Kolupaeva

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: kolupaeva@jinr.ru

The report provides an overview of the most significant achievements and current trends in neutrino physics over recent years. It synthesises and critically evaluates the outcomes of experimental and theoretical studies that have substantially expanded our understanding of the nature of these fundamental particles.

Topics will cover the study of neutrino oscillations one of the indications of beyond standard model physics; searches for neutrinoless double beta decay that will address the question whether neutrino are Majorana particles or not; measurements of the absolute neutrino masses; searches for the sources of astrophysical neutrinos and for the hypothetical sterile neutrinos. The findings presented outline priority directions for future experimental and theoretical work in the field.

Status and physics program of the NICA-MPD experiment at JINR

D. Larionova
for the MPD Collaboration Peter the Great

Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: dashalarion@gmail.com

The Multi-Purpose Detector (MPD) is one of the two major experiments at the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA), which is currently under construction at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna [1], [2]. The primary goal of the MPD experiment is to investigate strongly interacting matter at high baryon densities and moderate temperatures. In this region of the QCD phase diagram, a first-order phase transition and the QCD critical point are predicted. Similar conditions are also expected to exist in the cores of neutron stars and during neutron-star mergers. Relativistic heavy-ion collisions at the MPD provide a unique opportunity to create and study such matter under controlled laboratory conditions, complementing modern astrophysical observations [3].

The MPD physics program includes measurements of identified hadrons, hadronic resonances, strange and multi-strange baryons, hypernuclei, anisotropic flow, fluctuations and correlations, electromagnetic probes, and global hyperon polarization. These observables are sensitive to the equation of state of dense nuclear matter, the properties of the hadronic and partonic phases, and possible signatures of the QCD critical point. This talk will present the current status of the MPD detector construction, commissioning plans, and prospects for the first physics measurements at NICA.

The work was carried out under support from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. State assignment for fundamental research (code FSEG-2025-0009).

References

1. K. U. Abraamyan [et al.] (MPD Collaboration). Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. **628**, 99 (2011).
2. R. Kekelidze, R. Lednicky, V. Matveev [et al.] Eur. Phys. A **52**, 212 (2016).
3. A. Kisiel (MPD Collaboration). Nucl. Phys. A **1005**, 122006 (2021).

First results and plans of the BM@N experiment at NICA

R. Lednicky

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: jolos@theor.jinr.ru

The BM@N experiment is dedicated to a study of the hot and dense baryonic matter produced in heavy ion collisions using the NICA extracted beams from deuteron to Bismuth with kinetic energies of 1,5–4,5 AGeV. At such energies, the baryon density up to 3–4 times the nuclear saturation density is achieved. This allows one to search for the critical phenomena related with the mixed quark-gluon and hadronic phase in the region of a high baryonic chemical potential. It also allows one to constrain the matter Equation of State in the region of high baryon densities. First results on the production of positive pions, kaons, protons, deuterons and tritons in 3,2 AGeV Argon-nuclei collisions are presented and compared with the transport code predictions and parameterized with a Blast Wave Model. Based on the measured proton, deuteron and triton spectra, the deuteron and triton coalescence parameters and compound yield ratio $N_p N_t / N_d^2$ are given. Also shown are preliminary results on Λ -hyperon and neutral kaon spectra, anisotropic flows of protons and deuterons in Xe+CsI interactions at 3,8 AGeV. Recently, high statistics data on Xe+Sn interactions have been collected at the kinetic energies of the Xe beam of 1,6; 2,2 and 3 AGeV. In the next years, studies of Bi+Bi interactions at 1,6–3,8 AGeV are foreseen.

Проект компактного многозадачного нейтринного детектора на основе галлий содержащих сцинтилляторов

Б. К. Лубсандоржиев

Институт ядерных исследований РАН, Дубна, Россия
e-mail: lubsand@rambler.ru

Представлен проект компактного многозадачного нейтринного детектора на основе галлий-гадолиний содержащих сцинтилляторов. В числе основных физических целей проекта можно привести тестирование галлиевой аномалии, прецизионные измерения потоков солнечных нейтрино pp-цикла, исследования двойного безнейтринного бета-распада изотопа ^{160}Gd и т. д. Обсуждается выбор типа сцинтиллятора. Показано, что хорошим кандидатом для этих целей является неорганический сцинтиллятор активированный церием гадолиний-алюминий-галлиевый гранат – GAGG:Ce. Приведены результаты исследований оптических и сцинтилляционных параметров данного сцинтиллятора. Представлены результаты измерений характеристик прототипа ячейки нейтринного детектора на основе сцинтиллятора GAGG:Ce и кремниевых фотоумножителей.

Механизмы формирования спинов и угловые распределения фрагментов деления: Bending- и Wriggling-корреляции

Д. Е. Любашевский*, Л. В. Титова, С. В. Ключников, Ю. Д. Щербина, Т. Ю. Шашкина

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: dima_physicist@mail.ru

В низкоэнергетическом делении тяжёлых ядер проблема генерации собственного углового момента (спина) осколков остаётся одной из ключевых, выходя за рамки равновесной статистической теории. В настоящей работе на основе предразрывной коллективной динамики предложен механизм, согласно которому спин фрагментов формируется за счёт bending- и wriggling-колебаний делящегося ядра [1] на стадии от точки разрыва до формирования полностью ускоренных осколков. Указанные колебательные моды, связанные с относительным движением двух будущих фрагментов, приводят к возбуждению как их внутренних вращений, так и орбитального момента относительного движения.

В рамках модели предполагается, что в момент разрыва предфрагменты обладают набором вибрационных степеней свободы, включая bending (фрагменты деления вращаются антипараллельно относительно оси, перпендикулярной оси симметрии делящегося ядра.) и wriggling (фрагменты деления вращаются синфазно (параллельно) относительно оси, перпендикулярной оси симметрии делящегося ядра, тогда как орбитальное движение фрагментов (или остальная часть системы) вращается антипараллельно, что требуется для выполнения закона сохранения полного момента импульса.) [2]. Амплитуды этих мод определяют распределение спинов осколков. Показано, что вклады bending- и wriggling-мод сопоставимы по величине и оба вносят заметный вклад в формирование спина как лёгкого, так и тяжёлого фрагмента. Полученные распределения спинов хорошо согласуются с экспериментальными данными для реакций $^{232}\text{Th}(n,f)$, $^{238}\text{U}(n,f)$ и спонтанного деления ^{252}Cf [3].

Ключевым элементом модели выступает учёт орбитального момента L в качестве промежуточного резервуара, поглощающего флуктуации углового момента между фрагментами. Следствием этого является близость к нулю спин-спиновых корреляций между осколками, что не противоречит предразрывному механизму [4]. При этом распределения направлений спинов демонстрируют анизотропию, чувствительную к соотношению вкладов bending- и wriggling-колебаний. Сравнение с расчётами работы [5] подтверждает необходимость учёта деформации фрагментов и их моментов инерции.

Существенную роль играет также испарение нейтронов после деления: оно модифицирует наблюдаемые спиновые распределения, смещая средние значения и уменьшая дисперсию. Без учёта данного эффекта прямое сопоставление с экспериментом становится невозможным. Предложенный подход, основанный на концепции «холодного» разрыва и коллективных колебаниях [1], позволяет универсально описать угловые распределения спинов и корреляции в широком круге делящихся систем, открывая путь к пониманию динамики деления за пределами теплового равновесия.

Список источников

1. Nix J. R., Swiatecki W. J. Nucl. Phys. **71**, 1 (1965).
2. S. G. Kadmsky [et al.]. Phys. At. Nucl. **87**, 359 (2024).
3. J. N. Wilson [et al.]. Nature **590**, 566 (2021).
4. D. E. Lyubashevsky [et al.]. Phys. Rev. C. **111**, 054601 (2025).
5. Randrup J., Dossing T., Vogt R. Phys. Rev. C. **106**, 14609 (2022).

Исследования спиновых эффектов на ядерных мишенях в эксперименте СПАСЧАРМ

В. В. Мочалов (от имени коллаборации СПАСЧАРМ)

Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Протвино Московской обл., Россия
e-mail: mochalov@ihep.ru

На ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовского института» – ИФВЭ проводится систематическое изучение спиновых эффектов во взаимодействии адронов в эксперименте СПАСЧАРМ [1]. Основными задачами эксперимента являются измерение односпиновых и двухспиновых (в будущем) асимметрий с использованием поляризованной мишени и/или поляризованного пучка, в том числе с использованием ядерных мишеней. Одним из основных направлений исследований является также изучение таких физических наблюдаемых, как поляризация гиперонов и выстроенность векторных мезонов на ядерных мишенях.

В экспериментальных сеансах на пучке отрицательных мезонов с импульсом около 26 ГэВ/с получены первые экспериментальные данные по асимметрии заряженных π -мезонов, поляризации Λ и $\bar{\Lambda}$ -гиперонов и спиновой выстроенности $\rho^0(770)$ - и $K^{*-}(892)$ -мезонов. Полученные в эксперименте СПАСЧАРМ результаты измерения поляризации в реакциях $\pi^- A \rightarrow \Lambda X$ и $K^- A \rightarrow \Lambda X$ являются наиболее точными в мире. Впервые наблюдается поперечная поляризация (P_N) Λ -гиперонов, образованных при взаимодействии K^- -мезонов с ядрами.

В рамках второго этапа эксперимента будет создан канал поляризованных протонов и антипротонов, позволяющий существенно обогатить физическую программу эксперимента.

Список источников

1. Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ, Сотрудничество СПАСЧАРМ, ЭЧАЯ, 2023, Т. 54 (1). С. 6.

Exotic E1 resonances in nuclei

V. O. Nesterenko

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: nester@theor.jinr.ru

The exotic E1 excitations (pygmy, compression, toroidal) near the particle thresholds are of a paramount interest for astrophysical application and construction of nuclear equation of state [1]. We provide a basic information on these excitations and explore their interplay [2], [3], [4], [5]. The main attention is paid to the relation of irrotational pygmy resonance and vortical toroidal mode. The last experimental and theoretical results for the search of the toroidal resonance in reaction (α, α') , (e, e') and (e, e', γ) are outlined [6]. Besides, we briefly inspect: i) interplay of toroidal and cluster features in light nuclei [7], ii) relation of nuclear toroidal flow with Hill's vortex in hydrodynamics [5], [6], iii) unusual radiation properties of toroidal sources and their manifestation in metamaterials.

References

1. A. Bracco, E. G. Lanza, A. Tamii. Prog. Part. Nucl. Phys. **106**, 360 (2019).
2. A. Repko, P.-G. Reinhard, V. O. Nesterenko, J. Kvasil. Phys. Rev. C **87**, 024305 (2013).
3. V. O. Nesterenko, J. Kvasil, A. Repko, W. Kleinig [et al.]. Phys. Atom. Nucl. **79**, 842 (2016).
4. A. Repko, V. O. Nesterenko, J. Kvasil [et al.], Eur. Phys J. A **55**, 242 (2019).
5. V. O. Nesterenko, A. Repko, J. Kasil, P.-G. Reinhard, Phys. Rev. Lett. **120**, 182501 (2018).
6. P. von Neumann-Cosel, V. O. Nesterenko, I. Brandherm, P. I. Vishnevskiy, P.-G. Reinhard, J. Kvasil, H. Matsubara, A. Repko, A. Richter, M. Scheck and A. Tamii, Phys. Rev. Lett. **133**, 232502 (2024).
7. P. Adsley, V. O. Nesterenko [et al], Phys. Rev. C **103**, 044315 (2021).

Nuclear data in Russia: current status and possible prospects

P. S. Prusachenko^{1*}, N. A. Fedorov¹, Yu. N. Kopatch¹, D. N. Grozdanov^{1,2}, A. V. Andreev^{1,3}

¹Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Sophia, Bulgaria

³M. V. Lomonosov Moscow State University, Russia

*e-mail: prusachenko@jinr.ru

Nuclear data plays a crucial role in a number of applications, including advanced nuclear facility design, radiation materials science, spent nuclear fuel management, non-destructive material analysis, nuclear astrophysics, and surface studies by accelerated ion beam. Despite a long history of research, the field of nuclear data still has a number of gaps and open questions. This report will examine the current status of experimental nuclear data research in Russia for these applications, activities related to cross-section evaluation and the creation of evaluated nuclear data libraries, as well as potential directions and prospects for further research.

Probing nuclear structure with spectator nucleons from collisions of relativistic nuclei

I. A. Pshenichnov^{1,2*}, P. A. Iusupova², S. D. Savenkov^{1,2}, A. O. Svetlichnyi^{1,2}

¹ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

*e-mail: pshenich@inr.ru

Due to high initial kinetic energies of relativistic nuclei, hot and dense nuclear matter is created in their collisions in the overlap region of the nuclear density distributions. For decades, these extreme conditions have stimulated the search for a transition from hadronic nuclear matter to an unexplored state of matter: quark-gluon plasma (QGP). It was common to assume that nuclear structure effects in the initial nuclei, such as their deformation, the presence of a neutron skin (NS), nucleon-nucleon short-range correlations, and alpha-clustering, were of minor importance in studies of the transition to QGP. Indeed, all of these nuclear structure effects are characterized by an energy scale of a few MeV, which is far below the multi-GeV to TeV energy delivered to the overlap zone. Nevertheless, it is expected that some information about the nuclear structure of colliding nuclei will be preserved in relatively cold spectator nuclear matter outside the domain of the nuclear overlap. Simulating ultracentral ^{208}Pb – ^{208}Pb collisions using our Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders Model with the Minimum Spanning Tree clustering (AAMCC-MST) [1] showed that the cross sections for the emission of certain numbers of spectator neutrons in events with 0, 1, ..., 5 spectator protons varied by 50–250%, depending on the thickness of NS in ^{208}Pb [2]. According to AAMCC-MST, the calculated average neutron-to-proton ratio $\langle N_n/N_p \rangle$ as a function of the total number of free spectator nucleons NN in central (0–10%) ^{209}Bi –W collisions is particularly sensitive to the presence of NS in ^{209}Bi . This provides a quantitative probe of the neutron enrichment of the nuclear surface of ^{209}Bi [3].

We present our new calculations of the emission of spectator neutrons and protons in collisions of ^{124}Xe and ^{136}Xe projectiles with ^{124}Sn target in the context of the Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) experiment at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna. The inclusive cross-sections of spectator neutron emission, $d\sigma/dy$, as a function of neutron rapidity in minimum bias events were calculated using AAMCC-MST and were found to be similar for both ^{124}Xe and ^{136}Xe . However, the calculated average neutron-to-proton ratios $\langle N_n/N_p \rangle$ as a function of the total number of free spectator nucleons NN in central (0–10%) collisions demonstrate ~30% difference between the ratios calculated for the fragmentation of ^{124}Xe and ^{136}Xe . Furthermore, the presence of 12 extra neutrons in ^{136}Xe compared to ^{124}Xe results in a doubled $\langle N_n/N_p \rangle$ ratio for a relatively small NN of 5–10. These results highlight the importance of measuring $\langle N_n/N_p \rangle$ as a function of NN in central collisions in the BM@N experiment, in order to study the isospin effects in the fragmentation of relativistic nuclei. Other characteristics of spectator matter from Xe-Sn collisions are calculated and the possibilities of measuring them in the BM@N experiment are discussed.

References

1. R. Nepeivoda, A. Svetlichnyi, N. Kozyrev, I. Pshenichnov. *Particles* **5**, 40 (2022).
2. N. Kozyrev, A. Svetlichnyi, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov. *Eur. Phys. J. A* **58**, 184 (2022).
3. A. Svetlichnyi, S. Savenkov, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov. *Int. J. Mod. Phys. E* **33**, 2441027 (2024).

Исследование реакций радиационного захвата протона на ядрах p- и sd-оболочки в рамках высокоточных оболочечных моделей

Д. М. Родкин^{1,2*}, Ю. М. Чувильский^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

²Институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: rodkindm92@gmail.com

Прогресс теории астрофизических процессов с необходимостью опирается на надежные знания характеристик ядерных реакций, определяющих кинетику звезд. Зачастую, экспериментальное изучение этих характеристик в земных условиях сильно затруднено или невозможно. Так, из-за высоких, по отношению к звездным температурам, потенциальных барьеров такие трудности вызывает измерение сечений реакций радиационного захвата протона на ядрах p и sd-оболочек. В связи с этим на первый план выходят чисто теоретические или гибридные – частично использующие данные надежных измерений – методы.

Структура ядер p-оболочки успешно описывается современными *ab initio* методами, в частности моделью оболочек без инертного кора (NCSM), а ядер sd-оболочки – моделью оболочек с кором, в которой эффективное взаимодействие строится на базе NCSM [1]. Непосредственно NCSM не приспособлена для расчета распадных характеристик ядерных состояний и, как следствие, не может применяться для расчета сечений ядерных реакций. Для решения данной задачи, авторами был ранее разработан метод ортогонализованных функций кластерных каналов (CCOFM) [2], который позволяет получать асимптотические нормировочные коэффициенты связанных и амплитуды парциальных ширин резонансных состояний.

Возможность в рамках оболочечной модели рассчитывать ширины электромагнитных переходов вкупе с полученными из CCOFM асимптотическими характеристиками нижних состояний, позволяет вычислять сечения реакций радиационного захвата в рамках R-матричной теории ядерных реакций – как резонансных, так и прямых.

В данной работе мы представляем исследование процессов ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ и ${}^8\text{B}(p, \gamma){}^9\text{C}$. Они относятся к реакциям pp-III цепочки, которая может быть альтернативой слиянию трех альфа-частиц при получении ядер CNO группы. Результаты расчетов хорошо согласуются с известными экспериментальными данными в случае реакции ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$, что, в свою очередь, позволяет делать обоснованные теоретические предсказания сечения сложной для экспериментального изучения реакции ${}^8\text{B}(p, \gamma){}^9\text{C}$. Перспективы подхода для реакции (p, γ) на ядрах sd-оболочки изучены на примере процесса ${}^{20}\text{Ne}(p, \gamma){}^{21}\text{Na}$. Данная реакция является первой и самой медленной в Ne-Na цикле, неопределенность в её сечении напрямую влияет на нуклеосинтез в звездах AGB – асимптотической ветви гигантов и O-Ne сверхновых. Результаты проведенных расчетов асимптотических характеристик нижних уровней ${}^{21}\text{Na}$ показали хорошее согласие с результатами анализа экспериментальных данных в рамках метода искаженных волн. На основе рассчитанных характеристик ${}^{21}\text{Na}$ были получены сечение, астрофизический S-фактор и скорость реакции ${}^{20}\text{Ne}(p, \gamma){}^{21}\text{Na}$. Рассчитанная таким способом, скорость реакции оказывается значительно более точной и оправданной, чем полученная стандартными экспериментальными методами вплоть до температуры 0.2 ГК. так что наш расчет может значительно уточнить процессы нуклеосинтеза в звездах асимптотической ветви гигантов.

Разработанный нами подход к расчету сечений ядерных реакций позволяет широко использовать результаты *ab initio* вычислений в анализе процессов звездного нуклеосинтеза.

References

1. I. J. Shin, N. A. Smirnova [et al.]. Phys. Rev. C. **110**, 034306 (2024).
2. D. M. Rodkin, Yu. M. Tchuvil'sky. Phys. Rev. C. **103**, 024304 (2021).

Изучение свойств тяжелых и сверхтяжелых ядер в ЛЯР ОИЯИ

А. И. Свирихин

Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия
e-mail: asvirikhin@jinr.ru

В настоящее время, экспериментальная база Лаборатории ядерных реакций объединенного института ядерных исследований (ЛЯР) позволяет не только планировать работы по синтезу новых элементов с $Z \geq 119$, но и решать задачи по детальному изучению свойств уже известных тяжелых и сверхтяжелых ядер.

Изучение физических свойств тяжелых ядер связано с детальным изучением радиоактивного распада при помощи комбинированных детектирующих систем. Наиболее информативными методами являются: спектрометрия γ -квантов и конверсионных электронов (СЕ) при α -или β -распаде основных и изомерных состояний в атомных ядрах, при кулоновском возбуждении атомных ядер с использованием экзотических пучков и при γ -распаде изомеров, возбуждаемых в ядерных реакциях. Исследования спектров, связанных с различными типами возбуждений, позволяет делать выводы о характере и симметрии остаточных взаимодействий в ядрах, форме ядра в основном и возбужденных состояниях ядер, свойствах колебаний и вращений в атомных ядрах, взаимодействию коллективных и одно-частичных степеней свободы, структуре волновых функций основного и возбужденных состояний атомных ядер.

Также, существенный интерес представляет изучение спонтанного деления, деления из слабовозбужденных состояний тяжелых ядер. Экспериментальные возможности Лаборатории ядерных реакций, позволяют определять такие важные характеристики делящихся ядер, как – парциальные периоды полураспада, полная кинетическая энергия осколков, а также среднее число нейтронов, сопровождающих спонтанное деление.

Важное место в программе исследований ЛЯР также занимает работа по изучению химических свойств сверхтяжелых ядер. За последние годы, было проведено несколько экспериментов по изучению поведения Sn ($Z=112$) и Fl ($Z=114$) методом газадсорбционной термохроматографии. Оценивая влияние «релятивистских эффектов» на атомные оболочки этих необычайно массивных ядер, можно делать выводы об инертности, химической летучести указанных элементов.

В докладе подробно описывается экспериментальный парк Лаборатории ядерных реакций, использующийся в работах по определению перечисленных выше свойств тяжелых и сверхтяжелых ядер. В основе этого экспериментального парка находятся ускорители многозарядных тяжелых ионов У400 и ДЦ280. Сепараторы продуктов ядерных реакций, использующие пучки ускоренных ионов, позволяют с высокой эффективностью отделять искомые ядра от ионов пучка и продуктов побочных реакций. В докладе представлены сепараторы SHELS и ГРАНД, на которых в последние годы были получены впечатляющие результаты, связанные с регистрацией короткоживущих тяжелых ядерных систем.

Кроме того, дается описание сложных, многопараметровых детектирующих систем, располагающихся в фокальных плоскостях сепараторов и позволяющих с высокой точностью получать непосредственную информацию о поведении синтезированных тяжелых ядер.

**Экспериментальные исследования ядерной структуры.
Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова**

С. И. Сидорчук

Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия
e-mail: sidorchuk@jinr.ru

Программа экспериментальных исследований в Лаборатории ядерных реакций им. Флерова (ЛЯР) включает в себя несколько направлений, каждое из которых ведет к границам нуклонной стабильности. В области легчайших ядер исследования ведутся на вторичных пучках радиоактивных ядер на сепараторах АКУЛИНА-I и II. Первичные пучки ускоряются на циклотроне У400М, пущенном в эксплуатацию в 2026 году. В экспериментах используются, в частности, газовые мишени, такие как изотопы гелия ^3He и ^4He и водорода ^1H и ^2H . В реакциях передачи одного и двух нуклонов могут наблюдаться интерференционные паттерны, возникающие в результате перекрытия широких состояний. Структура ядер, а также экзотические механизмы реакций исследуются в квазисвободных реакциях на связанных частицах.

В Лаборатории разрабатываются новые экспериментальные установки для исследования ранее не известных нейтроноизбыточных изотопов, в частности, в районе оболочки $N=126$. Новые сепараторы будут расположены в новом экспериментальном здании, на пучках циклотрона У400.

На Фабрике сверхтяжелых элементов продолжаются работы по синтезу новых сверхтяжелых ядер с атомными номерами 119 и 120 в реакциях $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ и $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$. Планируются эксперименты по изучению химических свойств наиболее короткоживущих ядер с временами жизни менее 0.5 с. Для этого в ближайшее время в Лаборатории планируется запустить сверхпроводящий газонаполненный соленоид GASSOL.

Нейтринный телескоп BAIKAL-GVD: статус и основные физические результаты

М. Н. Сорокиков^{1,2} (от имени коллаборации Baikal-GVD)

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

e-mail: sorokovikov@jinr.ru

В космическом пространстве непрерывно протекают катастрофические процессы, которые ускоряют элементарные частицы до энергий, не достижимых в лабораторных условиях. Нейтрино распространяются сквозь Вселенную без поглощения и без отклонения магнитными полями, поэтому они оказываются уникальным переносчиком информации о таких процессах. Исследованием нейтринного излучения внеземного происхождения занимается нейтринная астрономия. Она дополняет такие традиционные методы исследования космических объектов и процессов, как гамма-астрономия и наблюдения космических лучей. Слабость взаимодействия нейтрино с веществом требует создания регистрирующих установок гигантских размеров. С 2015 г. в озере Байкал ведётся развёртывание нейтринного телескопа кубокилометрового объёма Baikal-GVD. В настоящее время эффективный объём телескопа составляет 0,8 км³, что делает его крупнейшим нейтринным телескопом в Северном полушарии. Модульная структура Baikal-GVD позволяет проводить экспериментальные измерения, не дожидаясь окончания развёртывания телескопа. В докладе будут представлены текущее состояние детектора и основные физические результаты.

Спонтанное и низкоэнергетическое вынужденное тройное деление ядер-актинидов: механизмы процесса и характеристики продуктов тройного деления

Л. В. Титова*, Д. Е. Любашевский, П. В. Кострюков, Я. О. Отводенко

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: titova_lv@phys.vsu.ru

Тройное деление тяжелых ядер с испусканием легкой заряженной частицы (ЛЗЧ), представляет собой процесс чувствительный к предразрывной конфигурации ядра и динамике образования шейки. При описании указанного деления важно, что в окрестности точки разрыва ядро остается «холодным» [1], что приводит к влиянию сверхтекучих нуклон-нуклонных корреляций на вероятности формирования ЛЗЧ.

В рамках механизма, описывающего тройное деление как процесс, происходящий с формированием промежуточного ядра в виртуальном состоянии [2] после вылета ЛЗЧ, в работе проведена оценка вероятностей формирования ЛЗЧ в шейке делящегося ядра в спонтанном и индуцированном тепловыми нейтронами делении ядер-актинидов. Формирование виртуального состояния промежуточного ядра связано с тем, что кинетическая энергия вылетающих ЛЗЧ превышает энергию кластерного распада Q составных делящихся ядер ^{252}Cf , ^{233}U и ^{242}Pu или Q принимает отрицательные значения. При использовании экспериментальных данных [3] по энергетическим распределениям и выходам ЛЗЧ от ^4He до ^{20}C в реакциях $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$, $^{241}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$, $^{249}\text{Cf}(n_{\text{th}},f)$ и $^{251}\text{Cf}(n_{\text{th}},f)$ на основе виртуального механизма, когда вылет ЛЗЧ происходит из шейки делящегося ядра, туннелируя через кулоновский барьер. В рамках ВКБ-приближения вычислены проницаемости потенциального барьера P и вероятности формирования ЛЗЧ в шейке делящегося ядра для наиболее вероятных конфигураций фрагментов деления. Наибольшие значения P и w характерны для α -частицы, что связано с её высокой кинетической энергией и кластерной устойчивостью. Для нейтроноизбыточных изотопов проницаемость барьера резко падает по сравнению с α -частицей, а вероятность формирования в шейке снижается вплоть до девятого порядка. При переходе от ^{239}Pu к ^{251}Cf значения P для одних и тех же ЛЗЧ уменьшаются из-за увеличения заряда фрагментов и высоты кулоновского барьера. Полученные результаты указывают на перспективность использования виртуального подхода для описания крайне редких событий вылета тяжёлых кластеров.

В отличие от тройного деления с вылетом ЛЗЧ, в коллинеарном тройном делении (КТД) [4], все три осколка имеют сравнимые массы и вылетают вблизи одной прямой. В разрабатываемом подходе КТД представляется как каскадный процесс: сначала материнское ядро делится на два фрагмента, после чего один из них испытывает вторичное деление вдоль той же оси. В рамках концепции «холодного» делящегося ядра [1] с учётом нулевых поперечных колебаний [5] рассчитаны спиновые и деформационные характеристики фрагментов КТД для реакций $^{252}\text{Cf}(sf)$ и $^{236}\text{U}(n_{\text{th}},f)$. Обнаружена чёткая корреляция между массовой асимметрией фрагментов и величиной спинов фрагментов деления. Полученные результаты свидетельствуют об определяющей роли оболочечных эффектов и нулевых поперечных колебаний в генерации углового момента фрагментов при низкоэнергетическом делении актинидов.

Список источников

1. S. G. Kadmsky, L. V. Rodionova Phys. Atom. Nucl., 68, 1433 (2005).
2. Л. В. Титова Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия. **64** (2021).
3. I. C. Tsekhanovich [et al.]. Phys. Rev. **67**, 034610 (2003).
4. F. Gönnenwein Nucl. Phys. A **734**, 213. (2004).
5. С. Г. Кадменский [и др.]. Письма в ЭЧАЯ **21**, 1045 (2024).

JUNO experiment: status report and perspectives

A. S. Chepurnov^{1,2} (on behalf of the JUNO collaboration)

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: aschepurnov@yandex.ru, chepurnov@sinp.msu.ru

Understanding neutrino behavior and properties is crucial for developing a complete description of matter and forces at the smallest scales. On June 10, JUNO's first physics result based on the analysis of valid data collected over 59 days from August 26 to November 2, 2025 was formally released. This analysis achieved a high-precision measurement of two key neutrino oscillation parameters $\sin^2 \theta_{12}$ and Δm^2_{21} , reducing the associated uncertainties by a factor of 1.6 compared to the world-average values from previous experiments. This initial analysis provides confidence that the detector will be able to determine the neutrino mass ordering (NMO). This first result from JUNO marks the beginning of a new era of precise measurements of neutrino oscillations and promises new discoveries in the study of the properties of these enigmatic fundamental particles.

JUNO is a unique, liquid scintillator detector. It has an unprecedentedly large effective ultra-low background 20 kt liquid scintillator target formed by 35.4-meter acrylic spherical vessel and shielded from external background by 700 m underground location and cylindrical 30 kt ultra-pure water pool playing a role of active muon veto. 20,000 20-inch photomultiplier tubes (PMTs) and 25,600 3-inch PMTs operate simultaneously to capture scintillation light in a wide dynamic range.

The experiment is fully operational now and ready to pursue its physics goals, such as NMO with an expected significance of 3–4 sigma in about six years, to measure three out of the six neutrino mixing parameters to a precision better than 1%, and conduct studies on supernova neutrinos, geo-neutrinos, solar neutrinos, atmospheric neutrinos, etc.. The phenomenon will be observed by resolving the fine structure in the energy spectrum of oscillating reactor electron antineutrinos. The anti-neutrino flux is emitted from 8 nuclear reactors at a baseline of about 52.5 km. To tune the reconstruction of antineutrino spectrum in JUNO, the satellite small JUNO-TAO reactor antineutrinos spectrometer provides the reference spectrum.

JUNO has been collecting data since August 2025. As data accumulates, numerous new results will be released sequentially, gradually unlocking new mysteries of neutrinos.

Актуальные проблемы развития ядерно-физических технологий для медицины и промышленности

А. П. Черняев^{1,2}, Е. Н. Лыкова^{1,2}, А. А. Щербаков^{1,2*}, Ф. Р. Студеникин^{1,2}, А. А. Ким^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: sherbakov.aa15@physics.msu.ru

В 2022 году ядерной физике в России исполнилось 100 лет [1]. Физика атомного ядра и элементарных частиц нашла большое число применений не только в науке, но и в народном хозяйстве. Ядерно-физические технологии используются в различных областях, таких как медицина, промышленность и сельское хозяйство. Развитие таких технологий лежит на стыке ядерной физики, физики излучений, ускорительной техники, методов регистрации и обработки данных, математического моделирования и инженерного приборостроения [2].

В России накоплен большой опыт создания и применения источников ионизирующего излучения [3]. Особое место занимают высокотехнологичные комплексы, в которых используются ускорители, томографические системы и специализированные источники излучения. Именно они во многом определяют современный уровень радиационных технологий в стране. В последние годы такие технологии все шире применяются не только в медицине, но и при радиационной обработке продукции, модификации свойств материалов, стерилизации медицинских изделий и биообъектов [4].

Одним из главных направлений практического применения ядерно-физических методов остается медицинская физика [5]. Здесь радиационные технологии связаны с развитием методов визуализации и лучевого лечения. Одновременно они требуют более точного описания процессов взаимодействия излучения с веществом и биологическими тканями. Важное значение имеют исследования вклада вторичных частиц ядерных реакций в формирование поглощенной дозы. С этим связана и оценка дополнительной дозовой нагрузки, возникающей при работе терапевтических установок [6]. Отдельную задачу составляют физические методы, позволяющие при обработке томографических данных различать здоровые и патологически измененные ткани.

Существенное значение имеет восстановление спектров излучения ускорителей. Эти данные необходимы для планирования радиационной обработки биологических объектов, медицинских изделий и сельскохозяйственной продукции [3]. Такое планирование связывает свойства источника, объект обработки, распределение дозы и требования к конечному результату. Поэтому развитие радиационных технологий требует не только новых установок, но и надежного дозиметрического сопровождения [4].

Актуальные проблемы развития радиационных технологий в России связаны с углублением уже полученных результатов и их практическим применением в новых областях. В центре внимания находятся совершенствование установок и методов, создание отечественных технологических решений, а также развитие систем планирования и дозиметрического сопровождения [2].

Не менее важна подготовка специалистов, способных работать на стыке физики, медицины, инженерии и промышленного производства [7]. Сочетание физических идей, приборных решений и подготовки кадров создает основу для дальнейшего развития радиационных технологий и укрепляет их роль в научном, медицинском и промышленном развитии страны.

Список источников

1. А. П. Черняев, Е. Н. Лыкова. Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. **78**, 2310101 (2023).
2. А. П. Черняев и др. ЯФ **88**, 124 (2025).
3. А. П. Черняев и др. ЯФ **82**, 425 (2019)
4. А. П. Черняев и др. Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. **80**, 2530201 (2025).
5. А. П. Черняев и др. Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. **81**, 2610701 (2026).
6. А. А. Щербаков А. А. и др. Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. **80**, 2550701 (2025).
7. А. П. Черняев и др. Медицинская физика. **1**, 63 (2024).

Восьминуклонные системы под *ab initio* микроскопом: спектры, кластеризация, распад и резонансные ядерные реакции

Ю. М. Чувильский^{1,2*}, Д. М. Родкин^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

²Институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: tchuvlyuri@gmail.com

На примере всестороннего изучения систем восьми нуклонов демонстрируются возможности, проблемы и перспективы разработанных авторами методов исследования легких ядер, как чисто *ab initio*, так и экстраполяционные, а также частично включающие в себя элементы упрощенных подходов к описанию распада и реакций.

Спектры восьминуклонных ядер изучены в энергетическом диапазоне вплоть до ~ 27 МэВ от порога распада ядра ^8Be . В расчетах с потенциалом Daejeon16 [1] получены практически все уровни этих ядер обнаруженные экспериментально. Предсказано множество новых состояний. В большинстве случаев отклонение вычисленных значений энергии от измеренных не превышает 1 МэВ.

Для разности кулоновских энергий изобар-аналоговых состояний ядер ^8Li и ^8Be с изоспином $T=1$ получена удивительная стабильность этой величины для всего массива изученных пар и уникальное для теории атомного ядра совпадение рассчитанных значений и известными измеренными. Кулоновские разности изобар-аналоговых состояний ядер ^8He и ^8Li с изоспином $T=2$ также четко воспроизводят эти тенденции. Эти результаты дали возможность с высокой точностью предсказать положение множества до сих пор не обнаруженных состояний в обсуждаемых ядрах.

Представлены также результаты *ab initio* вычислений спектроскопических факторов, асимптотических нормировочных коэффициентов, парциальных и полных ширин всех двух-тельных каналов распада уровней ядра ^8Be . На основе этих данных рассчитаны сечения всех бинарных резонансных реакций, протекающих с образованием компаунд-ядра ^8Be в диапазоне от предельно низких до границ изученного спектра. Проведен анализ известных экспериментальных данных, позволивший дополнить, подтвердить, уточнить, поставить под сомнение или отвергнуть некоторые из них.

Список источников

1. A. M. Shirokov, I. J. Shin, Y. Kim, [et al.], Phys. Lett. B **761**, 87 (2016).

Обобщенная теория конечных ферми-систем: формализм, анализ и оценки новых эффектов

С. П. Камерджиев*, М. И. Шитов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: kaev@obninsk.com

В Теории Конечных Ферми-Систем (ТКФС) [1] используются реалистическое, т. е. дельтаобразное взаимодействие между нуклонами, аппарат квантовых функций Грина и, следовательно, диаграммная техника Фейнмана, обеспечивающая наглядность и автоматизм при выводе формул. Основными исходными понятиями в ТКФС являются вершина, описывающая взаимодействие ядра с внешним полем, и амплитуда рассеяния для учета взаимодействия между нуклонами ядра. Включение эффектов самосогласования между средним полем и взаимодействием [2] было первым существенным этапом обобщения стандартной ТКФС. Однако эффекты квазичастично-фононного взаимодействия (КФВ) учитывались далеко не полностью.

В работах авторов [3–7] была развита обобщенная ТКФС, последовательно учитывающая эффекты КФВ. С использованием вариационного метода Ходеля, было выведено и исследовано уравнение для обобщенной вершины, которое содержит новые эффекты:

- слагаемые с тэдполом;
- слагаемые с регулярной частью амплитуды рассеяния;
- эффективные фонон-обменные взаимодействия, которые содержат обмен одним фононом во втором частично-дырочном канале и двумя фононами в обычном частично-дырочном канале;
- двух-фононные конфигурации, для которых;
- была сформулирована «двух-фононная модель в ТКФС».

В указанных и в последующих работах авторов был выполнен первичный анализ этих и других эффектов с использованием больших возможностей аппарата функций Грина (перенормировка, анализ корреляций в основном состоянии, вычитательная процедура и др.). Однако количественные оценки новых эффектов рассматривались недостаточно из-за сложности расчетов. В работах [8], [9] это было сделано с использованием приближения сепарабельных сил и были получены важные количественные результаты, которые обсуждаются в настоящем обзоре. Результаты расчетов в рамках «двухфононной модели в ТКФС» показали перспективность развитого подхода.

Развитый метод применим для учета самосогласования, к ядрам со спариванием, позволяет рассчитать обобщенную амплитуду рассеяния, охватывает более сложные, чем в работах [3–7], случаи по амплитуде рождения фонона, а также совместим с подходом из первых принципов.

Список источников

1. Мигдал А. Б. Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. Изд. 1. 1965. М. : Наука.
2. Мигдал А. Б. Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. Изд. 2. 1983. М. : Наука.
3. Kamerdzhiiev S. P., Shitov M. I. EPJA **56**, 265 (2020).
4. Kamerdzhiiev S. P., Shitov M. I. Phys. At. Nucl. **84**, 804 (2021).
5. М. И. Шитов, Д. А. Войтенков, С. П. Камерджиев, С. В. Толоконников. ЯФ. **85**, 1 (2022).
6. М. И. Шитов, С. П. Камерджиев, Письма в ЖЭТФ. **117**, 3 (2023).
7. М. И. Шитов, С. П. Камерджиев, С. В. Толоконников. ЯФ, **87**, 2 (2024).
8. С. П. Камерджиев, М. И. Шитов, Письма в ЖЭТФ. **122**, 785 (2025).
9. Ю.В. Ковалева, С. П. Камерджиев, М. И. Шитов. ЯФ. **87**, № 6 (2024).

**Производимые и поставляемые ООО «Гамматек» системы:
(ОЧГ-, CZT-, сцинтилляционные) – спектрометры, альфа-спектрометры,
а также ФЭУ, Si-ФЭУ и модули электроники для построения научного эксперимента**

И. С. Бредихин

Общество с ограниченной ответственностью «Гамматек», Москва, Россия

e-mail: ivan@gammatech.pro

В условиях наложенных на Россию со стороны недружественных стран санкций, при построении научного эксперимента требуется в дополнении к техническим и ценовым параметрам рассматриваемых систем, оказывается необходимым учитывать сам факт возможности поставки таких систем. Наша компания ООО «Гамматек» уже почти десять лет осуществляет как поставки оборудования, так и производит собственное оборудование на территории России. В рамках доклада будет дан обзор производимых и поставляемых нами решений

СПЕКТРОМЕТРЫ:

- **ГаммаСпек.** Полупроводниковые ОЧГ-спектрометры, включая свои модули электроники, предусилители, защиту и программное обеспечение
- **CZT-спектрометры (ЭЛАРИС)** разных модификаций, реализующие ПШПВ до 0,8% (на Cs137)
- **GT-02.** Сцинтилляционные гамма-спектрометры
- **АльфаСпек.** 2-канальные альфа-спектрометры

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ:

- **До 80 В.** Низковольтные прецизионные источники питания для питания PIPS детекторов, или SiPM
- **До 1500 В.** Источники для питания ФЭУ
- **До 5000 В.** Высокоточные источники для питания газовых детекторов, или ОЧГ

ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА:

- **Диджитайзеры D125, D500, D1000** (совместно с ООО «Диджитайзер»). Для скоростей оцифровки от 125МГц до 1000 МГц
- **МКА-250.** Серия многоканальных анализаторов для работы с гамма- и альфа-детекторами
- 64-канальный диджитайзер для работы с устройствами большой плотности каналов

КОМПЛЕКСНЫЕ УСТРОЙСТВА:

- **ПАК-ИИ** – Портативное устройство для поиска и идентификации гамма-излучающих нуклидов
- **ВЕЩЕМЕР** – Система для измерения остаточной радиоактивности в вещах
- **Сферы Боннера**
- **А/В 1-/2-/4-канальный низкофоновый счётчик.** Система служит для низкофоновых измерений альфа- (36% эффективность, фон < 0.08 имп/мин) и бета- (55% эффективность, фон < 1 имп/мин) излучающих образцов
- **Система визуализации медицинских нуклидов**

КОМПОНЕНТЫ:

- ФЭУ с широкой линейкой моделей;

- Si-ФЭУ;
- Сцинтилляционные кристаллы и сцинтисборки;
- Различные специализированные сборки на Si-ФЭУ
- Предусилители и делители напряжения;

ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ:

- **SpectrumHero.** Программа для записи, а также обработки спектров гамма- и альфа-спектров. От работы с различными спектрометрами, калибровок по энергии, ПШПВ, форме, эффективности до вычисления активности, автоматической идентификации и составления отчётов

- **ИИ** – серия модулей и программных алгоритмов для поиска и идентификации нуклидов среди получаемых спектров, либо композиции спектров

Наша команда постоянно работает над расширением списка и качества предлагаемых нами решений. Рады совместно реализовывать новые сложные проекты!

Новые возможности отечественных диджитайзеров для задач ядерной физики

А. В. Пашков

Общество с ограниченной ответственностью «Диджитайзер», В. Новгород, Россия

e-mail: info@edigitizer.ru

Современные эксперименты в области ядерной физики требуют высокоточной регистрации и обработки данных с детекторов «на лету». Диджитайзеры играют ключевую роль в создании автономных измерительных комплексов, обеспечивая необходимую точность и надёжность. Сложность экспериментов приводит к появлению новых требований к цифровой электронике – не только по скорости оцифровки, но и по усложняющейся обработке данных.

В докладе будет представлена новая модель диджитайзеров Д1000-4. Прибор обеспечивает частоту дискретизации 1 ГВыб/с при разрешении 16 бит. Данная модель позволяет оцифровывать сигналы со сверхбыстрых детекторов (алмазные, MPCs, SiPMs) и изучать процессы с пикосекундным разрешением.

Для моделей Д500 и Д1000 будет представлен новый высокоскоростной интерфейс передачи данных. Выгрузка данных осуществляется по 10-гигабитному Ethernet, что решает проблему «бутылочного горлышка» при передаче данных на компьютер в условиях больших загрузок.

В рамках доклада будут представлены практические результаты разработки программного комплекса DigiScore. Программное обеспечение позволяет не только настраивать прибор и сохранять оцифрованные данные в различных форматах, но и проводить визуализацию сигналов, а также строить различные спектры в режиме реального времени.

Сравнение ключевых параметров и областей применения диджитайзеров

Модель	Каналов	МВыб/с	Бит	Применение
МКА-250	2	250	16	Спектроскопия & работа в режиме МКА Опциональные источники питания: до 80 В / до 2000 В / до 5000 В
D125-16A	16	125	14	Спектроскопия & работа в режиме МКА Продвинутая обработка (усиление, форма)
D500-4/8/16	4 / 8 / 16	500	14	Средне-быстрые детекторы, суб-нс времена вместе с хорошим разрешением по энергии
D1000-2/4	2 / 4	1000	16	Сверхбыстрые детекторы (алмазные, MPCs, SiPMs). Изучение процессов с пикосекундным разрешением

Секция 1
Экспериментальные
и теоретические исследования
свойств атомных ядер

Section 1
Experimental and theoretical studies
of nuclear reactions

Fine structure in giant resonances

N. N. Arsenyev^{1*}, A. P. Severyukhin¹, I. T. Usman²

¹Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²School of Physics, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

*e-mail: arsenev@theor.jinr.ru

The decay of Giant Resonances (GRs) serves as a key illustration of how a coherent collective excitation transitions into chaotic motion of internal degrees-of-freedom within fermionic quantum many-body systems [1]. However, a comprehensive understanding of the decay widths remains elusive. Several experimental investigations into the origin of damping mechanisms of GRs in nuclei across the period table have been carried out at the iThemba LABS South Africa, using the state-of-the-art K600 magnetic spectrometer. It has been demonstrated that the primary mechanism driving the observed fine structure varies for different resonances. The fragmentation of elementary one-particle one-hole (1p-1h) excitations, known as Landau damping, appears to be the primary contributor to the distribution of Isovector Giant Dipole Resonance (IVGDR) strength, which gives rise to the fine structure [2]. In the case of the Isoscalar Giant Quadrupole Resonance (ISGQR) in the medium- and heavy-mass region, the decay is influenced by coupling to 2p-2h and many-particle many-hole (np-nh) states, which contributes to the spreading width. This indicates that there is a connection with the low-lying surface vibrations [3]. For the Isoscalar Giant Monopole Resonance (ISGMR), Landau damping is significant in the medium-mass region, whereas since the spreading width rises with the mass number, it plays a major role in heavy nuclei [4]. This study aims to provide a more detailed analysis of the fine structure of ISGMR, selecting the well-known spherical nuclei ⁵⁸Ni, ⁹⁰Zr, ¹²⁰Sn, and ²⁰⁸Pb as the subjects of investigation.

From a theoretical perspective, traditional approaches for fine-structure analysis of the ISGMR involve the Random Phase Approximation (RPA) using the Skyrme Energy Density Functional (EDF), as well as its quasi-particle variant (QRPA) for open-shell nuclei; see, e.g., [5,6]. The study of the ISGMR distribution involves taking into account a coupling between the simple 1p-1h excitations and more complicated configurations [5-7]. Our analysis, which incorporates Phonon-Phonon Coupling (PPC), accurately captures the gross structure of the ISGMR across various mass regions [4,7]. The effects of PPC lead to a redistribution of the main monopole strength to lower energy states and into higher energy tail. In particular, the PPC predictions of the fine structure of the ISGMR in ⁵⁸Ni, ⁹⁰Zr, ¹²⁰Sn, and ²⁰⁸Pb are in good agreement with the fine structure which is extracted from experimental data analysis [4,8]. More specifically, the substantial impact of octupole vibrations on the damping of the ISGMR and ISGQR in ²⁰⁸Pb has been highlighted [8].

The research was partly supported by the National Research Foundation of South Africa.

References

1. P. F. Bortignon, A. Bracco, R. A. Broglia. Giant Resonances: Nuclear Structure at Finite Temperature / Harwood Academic, Amsterdam (1998).
2. J. Carter [et al.], Phys. Lett. B **833**, 137374 (2022).
3. I. T. Usman [et al.], Phys. Rev. C **94**, 024308 (2016).
4. A. Bahini [et al.], Phys. Rev. C **109**, 014325 (2024); Nucl. Phys. A **1059**, 123078 (2025).
5. N. N. Arsenyev, A. P. Severyukhin, R. G. Nazmitdinov. JETP Lett. **118**, 718 (2023).
6. Z. Z. Li, Y. F. Niu, G. Coló. Phys. Rev. Lett. **131**, 082501 (2023).
7. A. P. Severyukhin, S. Åberg, N. N. Arsenyev, R. G. Nazmitdinov, Phys. Rev. C **95**, 061305 (2017).
8. N. N. Arsenyev, I. T. Usman, A. P. Severyukhin, A. Bahini, Int. J. Mod. Phys. E **36**, 2641012 (2026).

Новый экспериментальный метод изучения кластерной структуры ядер с помощью активной мишени

А. Ю. Арутюнова^{1*}, А. А. Дзюба^{1,2}, Е. М. Маев¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: arutiunova_ai@pnpi.nrcki.ru

Кластерная структура ядер – это образование в ядре малонуклонных систем (в основном дейтронов и альфа-частиц). При неупругом взаимодействии частиц пучка с ядрами мишени возможен процесс выбивания таких кластеров [1], [2]. Изучение этого процесса важно для определения механизма их образования и для получения новой информации о строении ядра, в том числе о его кластерной структуре [3]. Предполагается изучить следующие неупругие реакции: $p + A \rightarrow p' + Cl + X$, где A – ядро мишени, Cl – различные кластеры (например, d , t , ^3He и ^4He), X – остаточное ядро, p и p' – частицы пучка до и после рассеяния соответственно (возможно использование различных типов частиц пучка). Планируется исследование кластерной структуры большого набора ядер от гелия до ксенона.

Новый метод, предложенный в ПИЯФ с использованием активных мишеней, предполагает значительное уменьшение как статистических, так и систематических ошибок. Предложенный метод позволит впервые получить энергетические спектры выхода кластеров в области малых энергий. Кроме того, метод позволит впервые измерить корреляцию между частицами отдачи в активной мишени и углом рассеяния частиц пучка.

Активная мишень – ионизационная камера, которая является одновременно мишенью и детектором частиц отдачи. Активная мишень позволяет регистрировать все заряженные продукты реакций неупругого рассеяния частиц пучка на ядрах с энергией от 0,5 МэВ до 40 МэВ с ~100% эффективностью и 4π геометрией. В настоящий момент идет подготовка к проведению эксперимента на протонном пучке (энергия 1 ГэВ) ускорителя ПИЯФ (Гатчина). Подтверждением эффективности этого метода являются результаты тестового эксперимента на ускорителе МАМИ (Майнц, Германия), выполненного на активной мишени, наполненной $\text{He}+4\%\text{N}_2$ при давлении 10 атм, на электронном пучке с энергией 720 МэВ. Был проведен анализ данных и получены характерные корреляции энергий между соседними анодными кольцами для различных типов кластеров. С помощью корреляций пробег-энергия были вычислены характерные потери энергии на соседних анодах с различными наполнениями для возможных кластеров, которые в дальнейшем будут использоваться для их идентификации. На основании результатов анализа были разработаны необходимые программы для обработки данных с камеры – программы отображения сигналов и анализа их характеристик: собранной энергии и времени, по которым будут определены точка взаимодействия, угол вылета и, соответственно, тип частицы. Представленные результаты подтвердили принципиальную возможность проведения цикла исследования, направленного на детальное изучение структуры различных атомных ядер при помощи метода активной мишени.

Список источников

1. A. M. Poskanzer, G. W. Butler, E. K. Hyde. Phys. Rev. C **3** (1971).
2. Е. Н. Вольнин, А. А. Воробьев, В. Т. Грачев. Препринт ПИЯФ **101** (1974).
3. В. С. Барашенков, В. Д. Тонеев, Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами (1972).

Анализ альфа-распадных цепочек элементов 119 и 120 в двухцентровой оболочечной модели: конкуренция незапрещённых и запрещённых переходов

А. Н. Безбах*, Г. Г. Адамян, Н. В. Антоненко

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: bezbakh@jinr.ru

В настоящее время синтез сверхтяжёлых элементов с $Z=119$ и 120 является одной из ключевых задач экспериментальной ядерной физики. Идентификация этих ядер осуществляется, как правило, по цепочкам последовательных α -распадов, причём α -частицы могут испускаться не только из основного, но и из изомерных состояний. Поэтому теоретический анализ структуры низколежащих квазичастичных спектров и возможных α -переходов важен для интерпретации данных.

В рамках микроскопически-макроскопического подхода на основе модифицированной двухцентровой оболочечной модели (TCSM) [1] с параметрами, подобранными для воспроизведения спинов и чётностей основных состояний тяжёлых ядер, рассчитаны одно- и двухквазичастичные спектры ядер в цепочках α -распада изотопов $^{293-298}_{119}$ и $^{295-301}_{120}$.

Учитывается спаривание в приближении БКШ, а энергии Q_α для α -распадов из основного в основное состояние вычислены из масс ядер, полученных в той же модели [2]. Показано, что появление изомерных состояний, отличающихся квантовым числом K более чем на 3 от основного состояния, приводит к существенному усложнению α -спектров. Обнаружено, что в ряде случаев запрещённые α -переходы с орбитальным моментом $l=1, 2$ становятся более вероятными по сравнению с незапрещёнными ($l=0$) из-за энергетического выигрыша. Для цепочек нечётно-нечётных ядер $^{294,296,298}_{119}$ предсказано прерывание цепочки спонтанным делением на изотопах Db, тогда как для нечётных изотопов $^{295-301}_{120}$ – на изотопах Mt или Bh. Выполнено сравнение с доступными экспериментальными данными по энергиям α -распада. Установлено, что α -распадные спектры в цепочке распада могут отличаться от спектров, наблюдаемых при прямом получении ядра в реакции слияния.

Список источников

1. J. Maruhn, W. Greiner, Z. Phys. **251**, 431 (1972).
2. A. N. Kuzmina, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, Phys. Rev. C **85**, 014319 (2012).
3. G. G. Adamian, N. V. Antonenko, H. Lenske, Nucl. Phys. A **970**, 22 (2018).
4. A. N. Bezbakh [et al.], Phys. Rev. C **92**, 014329 (2015).

Расчет асимптотических нормировочных коэффициентов для нестабильных изотопов олова с нуклонным потенциалом дисперсионной оптической модели

О. В. Беспалова ^{1*}, Л. Д. Блохинцев ¹, М. М. Мосунов ^{1,2}, Д. А. Савин ¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: besp@sinp.msu.ru

Подход [1] к расчету асимптотических нормировочных коэффициентов (АНК) с использованием потенциала дисперсионной оптической модели (ДОМ) [2] развит для нестабильных ядер $A \pm 1$, где A – магическое ядро. АНК C_j , где j обозначает для краткости угловой момент состояния нуклона, связан с одночастичным АНК b_j и спектроскопическим фактором S_j соотношением:

$$C_j = \sqrt{S_j} \cdot b_j.$$

Одночастичный АНК находился при анализе волновой функции нуклона, являющейся решением одночастичного уравнения Шредингера с действительной частью комплексного потенциала ДОМ. Спектроскопический фактор ДОМ определяется дисперсионной составляющей потенциала, возникающей из дисперсионного соотношения, связывающего действительную и мнимую части потенциала ДОМ, и дается в виде отношения к предсказаниям модели независимых частиц.

Подход реализован на примере дважды магических нейтронно- и протонно-нестабильных изотопов олова $^{132,100}\text{Sn}$ в качестве ядер A . Потенциал ДОМ был определен при экстраполяции на область нестабильных ядер с использованием глобальных параметров KD [3] и скорректирован с целью описания экспериментальных и/или оцененных одночастичных энергий E_{nlj} изотопов $^{132,100}\text{Sn}$. Для определения АНК силовой параметр $V_{\text{HF}}(E_F)$ хартри-фоковской составляющей потенциала при энергии Ферми был в дальнейшем незначительно изменен для наилучшего описания энергий отделения нуклона от ядер A и $A+1$. В результате были вычислены следующие значения АНК соответственно для ядер ^{133}Sn , ^{131}Sn , ^{99}Sn :

$$C_{7/2} = 1,16 \text{ фм}^{-1/2}, C_{11/2} = 1,47 \text{ фм}^{-1/2}, C_{9/2} = 28,3 \text{ фм}^{-1/2}.$$

Полученные значения согласуются с имеющимися в литературе результатами теоретических расчетов.

Список источников

1. O. V. Bespalova, L. D. Blokhintsev, A. A. Klimochkina, D. A. Savin. Chin. J. Phys. **97**, 991 (2025).
2. C. Mahaux, R. Sartor. Adv. Nucl. Phys. **20**, 1 (1991).
3. A. J. Koning, J. P. Delaroche. Nucl. Phys. A **713**, 231 (2003).

**GEANT4-моделирование экспериментальной установки «Монумент».
Выбор оптимальной толщины мишени $^{136}\text{BaCO}_3$
в исследовании обычного мюонного захвата**

А. Д. Быстрыakov^{1,2,3*}, С. И. Васильев¹, Д. Р. Зинатулина^{1,2}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

³Физический институт имени В. А. Лебедева РАН, Россия

*e-mail: bystryakov-a@jinr.ru

Эксперимент «Монумент» – это проект, который направлен на проведение экспериментальных измерений мюонного захвата на дочерних по отношению к кандидатам на 2β -распад ядрах. Данные измерения важны для проверки точности теоретических расчетов ядерных матричных элементов [1].

В настоящее время существует ряд фундаментальных задач в физике, одной из которых является определение природы нейтрино. Наиболее эффективным для этого считается процесс безнейтринного двойного бета-распада ядер, так как он возможен только в том случае, если нейтрино имеет ненулевую массу и, если оно идентично своей античастице. Известно, что на скорость протекания реакции $0\nu 2\beta$ распада влияет не только масса нейтрино, но и величина ядерного матричного элемента [1]. Для исследования этих важных процессов двойного бета-распада подходит обычный мюонный захват.

Важным в таких экспериментах, как «Монумент», является выбор соответствующих мишеней, исследование прохождения мюонов через вещество, а также процессов, протекающих в результате мюонного захвата при помощи GEANT4. В связи с высокой стоимостью обогащенных стабильных изотопов подбор оптимальной толщины мишени в таких экспериментах имеет большое значение, а также понимание оптимальной геометрии для повышения эффективности измерительной установки. Наряду с этим, одной из важных задач является определение абсолютной эффективности германиевых полупроводниковых детекторов, используемых в эксперименте, с помощью моделирования.

В настоящей работе представлены результаты моделирования система быстрого отбора мюонных событий, состоящей из сцинтилляционных счетчиков C0, C1, C2, C3, с мишенями из Fe, Al, Cu [2], а также обогащенного $^{136}\text{BaCO}_3$. Смоделированы процессы мюонного распада в мишенях при использовании оптимизированного пучка мюонов, соответствующего экспериментальным условиям. Выявлены оптимальные параметры мишеней для железа, алюминия, меди и карбоната бария, при которых достигается максимальное число захватов мюонов. Представлены результаты моделирования по определению эффективности германиевых детекторов, применяемых в системе детектирования продуктов мюонного захвата.

Список источников

1. D. Zinatulina [et al.], PhysRevC. **99**, 024327 (2018).
2. T. Suzuki, D. F. Measday, PhysRev. C **35**, 2212 (1987).

Exploring the superheavy nuclei using ^{50}Ti and ^{54}Cr beams

A. A. Voinov¹, Yu. Ts. Oganessian¹, V. K. Utyonkov^{1,*}, D. I. Solov'yev¹, F. Sh. Abdullin¹,
D. Ibadullayev^{1,2}, M. G. Itkis¹, N. D. Kovrizhnykh¹, D. A. Kuznetsov¹, O. V. Petrushkin¹,
A. V. Podshibiakin¹, A. N. Polyakov¹, A. G. Popeko¹, R. N. Sagaidak¹, L. Schlattauer^{1,3}, V. D. Shubin¹,
M. V. Shumeiko¹, Yu. S. Tsyganov¹, A. V. Sabelnikov¹, D. Abdusamadzoda¹, A. Yu. Bodrov¹,
M. G. Voronyuk¹, G. A. Bozhikov¹, N. V. Aksenov¹, A. V. Khalkin¹, Z. G. Gan⁴, Z. Y. Zhang⁴,
M. H. Huang⁴, H. B. Yang⁴, J. G. Wang⁴, M. M. Zhang^{1,4}, X. Y. Huang^{1,4,5}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

³Palacký University Olomouc, Department of Experimental Physics, Faculty of Science,
Olomouc, Czech Republic

⁴State Key Laboratory of Heavy Ion Science and Technology, Institute of Modern Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China

⁵School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China

*e-mail: utyonkov@jinr.ru

The $^{238}\text{U}(^{54}\text{Cr},4n)^{288}\text{Lv}$ and $^{242}\text{Pu}(^{50}\text{Ti},3-4n)^{288,289}\text{Lv}$ reactions were studied using the gas-filled separator DGFRS-2. The $^{242}\text{Pu}+^{50}\text{Ti}$ experiment was carried out at the excitation energies of the compound nucleus ^{292}Lv $E^* = 41$ and 36 MeV. During the experiments, three new isotopes were discovered: two α -decaying nuclei ^{288}Lv and ^{289}Lv , as well as spontaneously fissioning ^{280}Cn , observed following the first detection of the α decay of ^{284}Fl . A decline in E^* led to a drop of the total fusion-evaporation cross section by about an order of magnitude, from 540^{+410}_{-250} fb to 54^{+141}_{-46} fb. Besides, for the first time we have registered the pxn channel of the $^{242}\text{Pu}+^{50}\text{Ti}$ reaction which was not evidently observed in the ^{48}Ca -induced reactions in previous studies.

The cross section of the $4n$ -channel of the $^{238}\text{U} + ^{54}\text{Cr}$ reaction [1], leading to the same compound nucleus, was found to be approximately 15 times lower than the total cross section of the $^{242}\text{Pu} + ^{50}\text{Ti}$ reaction [2] at similar excitation energy. This proves that reactions of actinide isotopes with ^{50}Ti ions are more preferable to those with ^{54}Cr by an order of magnitude for the synthesis of new elements 119 and 120.

References

1. Yu. Ts. Oganessian [et al.], Phys. Rev. C **112**, 014603 (2025).
2. Yu. Ts. Oganessian [et al.], Phys. Rev. C **113**, 014614 (2026).

The method for verifying the enhancement of multipole transitions by vortex photons via activity measurement

Y. Wang^{1*}, O. V. Bogdanov¹, F. A. Rasulova², Y. Yang³

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³ Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China

*e-mail: yanchzhao1@tpu.ru

It is believed that twisted photons [1], [2], [3] can enhance multipole transitions in atomic nuclei; however, this effect has not yet been experimentally confirmed. Direct verification of multipole transition enhancement presents difficulties. We have found that, it can be verified through indirect processes – specifically, by exciting the atomic nucleus to a higher energy level, followed by particle emission and de-excitation to an isomer state. The yields of radioactive products resulting from low-energy photonuclear reactions – such as $^{44\text{m,g}}\text{Sc}$, $^{58\text{m,g}}\text{Co}$, and $^{87\text{m,g}}\text{Y}$ —along with their isomeric states can be determined through activity measurements. Furthermore, the isomeric yield ratios (IYR) of these isomeric pairs provide information regarding the spin distribution of the compound nuclear states [4], [5].

We propose that by comparing the IYR and isomeric production cross section obtained under irradiation by planar photons versus vortex photons, one can experimentally test whether vortex photons indeed transfer additional angular momentum. We outline four distinct experimental methods to detect the multipole enhancement induced by twisted photons, applicable to (γ, γ') and (γ, n) reactions across various energy regimes. We also enumerate specific isomeric pairs and their corresponding photonuclear reactions that satisfy the requisite experimental conditions. Based on the energy spectrum parameters of the quasi-monoenergetic beam obtained from the Back Compton scattering of the SLEGS and the IYR results of $^{85\text{m,g}}\text{Sr}$ and $^{89\text{m,g}}\text{Zr}$ obtained from the photoneutron reaction of the plane beam, the IYR variation caused by the vortex beam was calculated.

References

1. A. A. Sokolov, P. O. Kazinski, *Phys. and Nucl.* **87**, 561 (2023).
2. T. Kirschbaum, T. Schumm, A. Pállfy, *Phys. Rev. C* **110**, 064326 (2024).
3. S. Liu, L. Ji, *Phys. Rev. A* **113**, 013121 (2026).
4. M. Zhou, Z. Hao, Q. Sun [et al.], *Phys. Rev. C* **111**, 054612 (2025).
5. O. V. Poriadina, S. S. Belyshev, A. A. Kuznetsov [et al.], *Mosc. Univ. Phys. Bull.* **80**, 2560201 (2025).

Проверка CVC-гипотезы и унитарности матрицы СКМ на основе анализа скорректированных значений Ft для сверхразрешённых β -переходов

А. К. Власников¹, И. С. Гусев²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия

e-mail: a.vlasnikov@spbu.ru; ilya_ilua_gusev@mail.ru

Сверхразрешённые β -переходы Ферми между изобар-аналоговыми состояниями со спином и чётностью 0^+ при изоспине $T = 1$ дают наиболее точное определение элемента V_{ud} матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы (СКМ) и обеспечивают строгую проверку гипотезы сохранения векторного тока (CVC), согласно которой векторная константа слабого адронного взаимодействия G_V не перенормируется ядерной средой. Современные оценки демонстрируют отклонение от унитарности первой строки СКМ на уровне $\sim 2\sigma$ («аномалия угла Кабиббо» [1]), значимость которого критически зависит от точности радиационных поправок и поправок на нарушение изоспиновой симметрии, что делает актуальным согласованный пересчёт ядерно-физических данных.

В настоящей работе впервые применена усовершенствованная методика [2], основанная на χ^2 -анализе согласованности данных относительно взвешенного и невзвешенного среднего и пригодная при малом числе измерений, для систематической переоценки периодов полураспада $T_{1/2}$ и коэффициентов ветвления BR для 23 сверхразрешённых $0^+ \rightarrow 0^+$ β -переходов. Парциальный период полураспада t определяется как

$$t = T_{1/2} (1 + P_{EC}) / BR,$$

где P_{EC} – относительная вероятность электронного захвата (отношение вероятностей электронного захвата и β^+ -распада), а «скорректированное» значение Ft , постоянство которого служит критерием CVC-гипотезы, имеет вид

$$Ft = ft(1 + \delta'_R)(1 + \delta_{NS} - \delta_C) = K / [2G_V^2(1 + \Delta_R^V)] = const,$$

где δ'_R , δ_{NS} , Δ_R^V – радиационные поправки, δ_C – поправка на нарушение изоспина, K – известная константа, f – теоретически вычисляемая интегральная функция Ферми. В отличие от анализа [3], использованы новейшие значения δ_C из [4] и функции f из [5], включены новые данные по $T_{1/2}$ и BR ; для отбора согласованных измерений применён критерий Шовене. Идентифицирован статистический выброс – Ft -значение ^{62}Ga .

По результатам анализа 14 наиболее точно измеренных нуклидов получено среднее $Ft = 3073,5 (3,1)$ с, не зависящее от Z дочернего ядра в пределах погрешности, что согласуется с CVC-гипотезой. Найдены векторная константа связи $G_V/(hc)^3 = 1.1355(6) \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$ и элемент $V_{ud} = 0,97353 (51)$. Проверка унитарности первой строки матрицы СКМ

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0,9981 (11)$$

со значениями V_{us} и V_{ub} из [6] соответствует отклонению от унитарности на $1,8\sigma$ — менее напряжённому, чем в [3] ($2,4\sigma$). Результаты не противоречат CVC-гипотезе, уточняют значимость «аномалии угла Кабиббо» и демонстрируют преимущества применённой статистической методики при работе с малыми выборками.

Список источников

1. V. Cirigliano, A. Crivellin, M. Hoferichter, M. Moulson, Phys. Lett. B **838**, 137748 (2023).
2. N. K. Kuzmenko, Appl. Radiat. Isot. **180**, 110039 (2022).
3. J. C. Hardy, I. S. Towner, Phys. Rev. C **102**, 045501 (2020).
4. L. Xayavong, N. A. Smirnova, F. Nowacki, Phys. Rev. C **112**, 055503 (2025).
5. C.-Y. Seng, M. Gorchtein, Phys. Rev. C **109**, 045501 (2024).
6. S. Navas [et al. Particle Data Group], Phys. Rev. D **110**, 030001 (2024).

Wigner's SU(4) spin-isospin symmetry and MNT & fragmentation nuclear reactions

I. N. Izosimov

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: izosimov@jinr.ru

In the case of exact Wigner spin-isospin SU(4) symmetry, the energies of Isobar Analog Resonance (IAR) and Gamow-Teller Resonance (GTR) are degenerate, and we can expect that $E_{IAR} \approx E_{GTR}$. In experimental and theoretical analysis of GTR data, a tendency of convergence of GTR and IAR energies (Fig. 1) with increasing $(N-Z)/A$ has been noticed [1], [2]. This fact may be interpreted as an approximate realization of SU(4) symmetry in a certain nuclear region, namely for nuclei with large $(N-Z)/A$, where spin-isospin SU(4) symmetry determines nuclear properties (the SU(4) region). From a simple estimate (Fig. 1), it follows that the value $Z/N \approx 0,6$ corresponds to the SU(4) region [2].

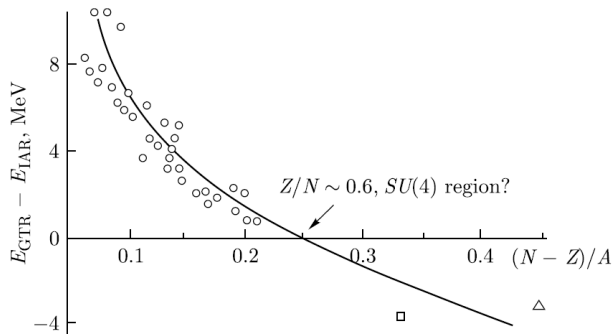


Fig.1. The difference $E_{GTR} - E_{IAR}$ as a function of the neutron excess [1]. Data for ^{11}Li (triangle) and ^6He (square) were added [2]

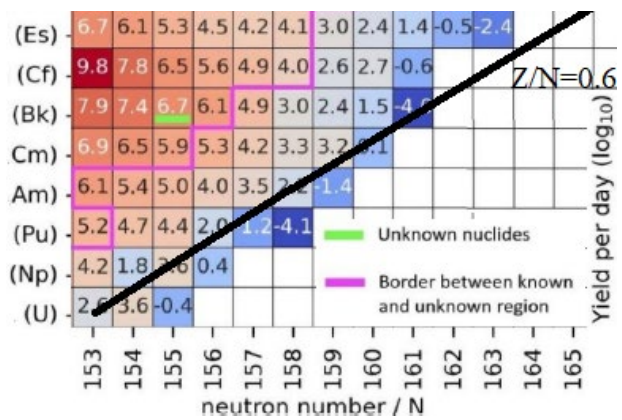


Fig.2. Expected yields ^{48}Ca ($E_{\text{lab}} = 293 \text{ MeV}$, $1.2 \text{ p } \mu\text{A}$) + ^{251}Cf ($500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) at 1% transmission efficiency [3]

Based on theoretical predictions, multinucleon transfer (MNT) reactions offer an approach to these SU(4) region for heavy nuclei [3] and fragmentation reactions for light nuclei [4]. In this report the peculiarities of the β - and γ -decays for light (Fig.1) and heavy (Fig. 2) nuclei in the SU(4) region are discussed.

References

1. Yu. V. Naumov, A. A. Bykov, I. N. Izosimov, Sov. J. Part. Nucl. **14**, 175 (1983).
2. I. N. Izosimov, EPJ Web of Conferences. **239**, 02003 (2020).
3. H. M. Devaraja [et al.], Physics letters. B **862**, 139353 (2025).
4. T. Kubo [et al.], IEEE Trans. Appl. Supercond. **17**, 1069 (2007).

Измерение выстроенности $K^{*-}(892)$ -мезонов, образованных в каон-ядерных и пион-ядерных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70

Н. К. Калугин (эксперимент СПАСЧАРМ)

Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

Nikita.Kalugin@ihep.ru

На ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовского института» – ИФВЭ проводится систематическое изучение спиновых эффектов во взаимодействии адронов в эксперименте СПАСЧАРМ [1]. В экспериментальных сеансах на пучке отрицательных мезонов с импульсом около 26 ГэВ/с получены экспериментальные данные по измерению спиновой выстроенности $K^{*-}(892)$ -мезонов.

Представлены результаты по измерению спиновой выстроенности $K^{*-}(892)$ -мезонов, образованных в K^-A -взаимодействиях и π^-A -взаимодействиях (где $A = C, Al, Cu, Sn, W$) при $x_F > 0,4$ и $p_T < 1,2$ ГэВ/с при импульсе мезонных пучков 26,5 ГэВ/с, в различных системах отсчета: спиральности, поперечной, Готфрида-Джексона, Эдэйра, Фенстера-Урецкого.

Список источников

1. Проект эксперимента СПАСЧАРМ, Сотрудничество СПАСЧАРМ, ЭЧАЯ. **54** (1), 54, 6 (2023).

Gamma de-excitation of ^{90m}Zr isomer

M. S. Kosarev^{1,2,3*}, N. N. Arsenyev¹, A. P. Severyukhin¹

¹Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Branch of Lomonosov Moscow State University in Sarov, Sarov, Russia

*e-mail: kosarev@theor.jinr.ru

The nuclear metastable energy levels or isomers arise as a result of a dramatic change in the structure between two nuclear states. This can be due to large differences in the angular momenta of these initial and final states and/or other degrees of freedom such as spin projection, single particle configuration or shape, as well as small energy differences between levels [1]. On the basis of hindrance mechanisms to their respective decays, the isomers can be classified into spin and seniority isomers in spherical regions. The traditional areas where such states are observed, and indeed where more are expected, are in medium-heavy to heavy nuclei close to closed shells, where the valence particles can occupy orbits with high spin. This occurs near the closed neutron and proton shells with $N=50$ and $Z=40$ ($A\sim 90$), $N=82$ and $Z=50$ ($A\sim 130$), $N=82$, $Z=64$ ($A\sim 150$), and $N=126$, $Z=82$ ($A\sim 210$). These conditions lead to the formation of multi-particle states with high-spin at relatively low energies. The $Z=40$ subshell closure is clearly demonstrated by the well-known level structure of the ^{90}Zr nucleus, for which the lowest-energy particle-hole $\{\pi 1p_{1/2}; \pi 1g_{9/2}^{-1}\}$ excitation produces the 0.8 sec 5^- isomeric state [2].

A powerful microscopic approach for describing the low-energy nuclear spectroscopy is the quasiparticle-phonon model (QPM) [3]. The model Hamiltonian is diagonalized in a space spanned by states composed of one, two, and three phonons which are generated in quasiparticle random phase approximation (QRPA). The QPM enables one to perform the calculations in very large configurational spaces. Up-to-date model is based on the Skyrme energy density functional (EDF) [4].

The analysis of the decay of the 0.8 sec 5^- isomeric state is performed by using the EDF f. in the p-h channel and the density-dependent pairing interaction [5]. The influence of the phonon-phonon coupling is studied. The calculated branching ratios generally align closely with the experimental ones.

The research was supported within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, topic No. 6 «Nuclear and Radiation Physics» (stage 2023-2025).

References

1. S. Garg [et al.], At. Data Nucl. Data Tables. **150**, 101546 (2023).
2. O. Brandstadter [et al.], Nucl. Instrum. Methods. **104**, 45 (1972).
3. N. L. Iudice [et al.], J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **39**, 043101 (2012).
4. A. P. Severyukhin, V. V. Voronov, Nguyen Van Giai, Eur. Phys. J. A **22**, 397 (2004).
5. A. P. Severyukhin, N. N. Arsenyev, N. Pietralla, V. Werner, Eur. Phys. J. A **54**, 4 (2018).

Устойчивость оболочечной структуры сверхтяжёлых ядер в деформированных потенциалах Нильсона и Вудса–Саксона

Д. Е. Любашевский, Цзе Янь, П. В. Кострюков*, В. В. Зайчиков

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: kostryukov@phys.vsu.ru

Синтез сверхтяжёлых элементов остаётся одной из центральных задач современной ядерной физики. После получения элементов вплоть до ($Z=118$) особый интерес представляют элементы 119 и 120, эксперименты по синтезу которых рассматриваются в качестве следующего этапа исследований границ существования атомных ядер [1], [2]. Успех подобных экспериментов во многом определяется надёжностью теоретических предсказаний относительно оболочечной структуры и связанных с ней эффектов дополнительной стабилизации сверхтяжёлых систем. Согласно современным представлениям, существование сверхтяжёлых ядер обусловлено оболочечными эффектами, компенсирующими сильное кулоновское отталкивание между протонами. Анализ одночастичной структуры является необходимым этапом при исследовании свойств ядер в области предполагаемого острова стабильности, поскольку именно особенности одночастичного спектра определяют величину оболочечных поправок, используемых в макро-микроскопических моделях атомного ядра [3].

Одним из наиболее распространённых инструментов анализа оболочечной структуры являются деформированные потенциалы Нильсона и Вудса–Саксона. Данные подходы позволяют исследовать эволюцию одночастичных уровней при изменении формы ядра, выявлять энергетические зазоры вблизи поверхности Ферми и анализировать их связь с оболочечными эффектами [4], [5].

Несмотря на значительное количество выполненных расчётов, вопрос об устойчивости оболочечных зазоров в области сверхтяжёлых ядер остаётся открытым. Различные модели среднего поля нередко приводят к отличающимся предсказаниям относительно положения магических чисел, роли деформации и величины оболочечных эффектов. В связи с этим представляет интерес исследование того, насколько устойчивыми являются особенности одночастичной структуры при изменении параметров модели и деформации ядра.

В настоящей работе планируется провести сравнительный анализ одночастичных спектров сверхтяжёлых ядер в области ($Z=119$)–120 в рамках деформированных потенциалов Нильсона и Вудса–Саксона. Особое внимание будет уделено исследованию эволюции уровней вблизи поверхности Ферми и анализу устойчивости оболочечных зазоров относительно выбора модели среднего поля и параметров деформации. Полученные результаты могут быть использованы для последующего расчёта оболочечных поправок методом Струтинского и анализа устойчивости сверхтяжёлых ядер, представляющих интерес для современных экспериментальных программ по синтезу новых химических элементов.

Список источников

1. Yu.Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov. Rep. Prog. Phys. **78**, 036301 (2015).
2. Yu.Ts. Oganessian, K. P. Rykaczewski, P. A. Wilk [et al.], Phys. Scr. **97**, 083003 (2022).
3. P. Möller, A. J. Sierk, T. Ichikawa [et al.], At. Data Nucl. Data Tables. **109–110**, 1 (2016).
4. S. G. Nilsson [et al.], Nucl. Phys. A. **131**, 1 (1969).

***Ab initio* no core shell model calculations of *sd*-shell nuclei**

I. A. Mazur^{1*}, Y. Kim², N. A. Smirnova³, I. J. Shin⁴, A. M. Shirokov⁵

¹Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Russia

²Center for Exotic Nuclear Studies, Institute for Basic Science, Republic of Korea

³Laboratory of Physics of the Two Infinities Bordeaux, CNRS/IN2P3 – University of Bordeaux, France

⁴Institute for Rare Isotope Science, Institute for Basic Science, Republic of Korea

⁵Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

*e-mail: mazur@inr.ru

We present *ab initio* no-core shell-model (NCSM) [1] calculations for the entire *sd*-shell using the Daejeon16 [2] nucleon-nucleon (*NN*) interaction. These results obtained using a model space including all many-body states up to $N_{\max} = 4$ excitation quanta. Energy levels, as well as M1 and E2 transitions, are computed. We demonstrate a reasonable convergence of the excitation spectrum dominated by $0\hbar\Omega$ (valence-space) configurations throughout the *sd*-shell.

In recent years, a significant progress has been achieved in the development of non-perturbative methods for constructing valence-space effective Hamiltonians based on realistic *NN* interactions. One of such methods employs the unitary Okubo–Lee–Suzuki transformation applied to the NCSM solutions. Using this method, an effective interaction for the *sd*-shell, denoted DJ164th [3], has been derived from NCSM calculations of nuclei with $A = 16 \div 18$ nucleons using the Daejeon16 interaction in the same $N_{\max} = 4$ model space. The respective effective electromagnetic transition operators are presented in Ref. [4]. In the present work, we discuss the agreement between the NCSM results and those of calculations performed with the effective valence space DJ164th interaction.

References

1. B. R. Barrett, P. Navrátil, J. P. Vary, Prog. Part. Nucl. Phys. **69**, 131 (2013).
2. A. M. Shirokov, I. J. Shin, Y. Kim, M. Sosonkina, P. Maris, J. P. Vary, Phys. Lett. B **761**, 87 (2016).
3. I. J. Shin, N. A. Smirnova, A. M. Shirokov, Z. Yang, B. R. Barrett, Zh. Li, Y. Kim, P. Maris, J. P. Vary, Phys. Rev. C **110**, 034306 (2024).
4. Zh. Li, N. A. Smirnova, A. M. Shirokov, I. J. Shin, B. R. Barrett, P. Maris, J. P. Vary, in *Akito Arima Memorial Volume*, edited by T. T. S. Kuo, T. Otsuka, K. K. Phua, J. P. Vary, World Scientific, Singapore, P. 35 (2025).

Isotopic dependence of the fission threshold in nuclei with $z=114$ and $z=120$

E. V. Mardyban^{1,2*}, A. Rahmatinejad¹, T. M. Shneidman¹, G. G. Adamian¹, N. V. Antonenko¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Dubna State University, Dubna, Russia

*e-mail: mardyban@theor.jinr.ru

Potential energy surfaces of superheavy nuclei are investigated within the multidimensionally constrained relativistic mean-field model [1]. The results are analyzed using the Strutinsky shell-correction method, with particular emphasis on ^{296}Lv and isotopic chains of $Z=114$ and $Z=120$. The analysis reveals that triaxial degrees of freedom substantially reduce the barrier height along the triaxial fission pathway compared to the axial fission path in ^{296}Lv . A steplike behavior emerges in proton shell corrections for $Z=114$ isotopes, contrasting with the smoother patterns observed in $Z=120$ isotopes, is attributed to the differences in the ground-state deformations. The observed correlation between fission-barrier maxima and shell-correction minima points to the shell closures at neutron numbers $N=172$ and $N=184$ at $Z=114$ and 120 .

References

1. E. V. Mardyban, A. Rahmatinejad, T. M. Shneidman, G. G. Adamian, S.-G. Zhou, N. V. Antonenko, *Phys. Rev. C* **113**, 054308 (2026).

Scissors mode in ^{254}No

M. A. Mardyban^{1,2*}, V. O. Nesterenko^{1,2}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² Dubna State University, Dubna, Russia

*e-mail: mmardyban@mail.ru

Low-energy multipole excitations in nobelium isotopes are of considerable interest both from the viewpoint of the structure of superheavy deformed nuclei and in connection with recent experimental data on M1 excitations in ^{254}No [1]. In the present work, the low-energy spectrum of ^{254}No is investigated within the fully self-consistent Quasiparticle Random Phase Approximation (QRPA) using Skyrme forces [2], [3]. This study continues our previous investigation of low-energy collective excitations in nobelium isotopes, where number of characteristic structural features of $^{250-260}\text{No}$ were analyzed within the same microscopic framework [4].

In our calculations, transition probabilities $B(M1)$ are also found for low-energy $K^\pi=1^+$ states. However, the analysis of the microscopic structure of these excitations and the corresponding velocity fields shows that a large $B(M1)$ value alone is not a sufficient criterion for an unambiguous identification of a state as an orbital scissors mode. According to our results, the dynamics of these states differs substantially from the classical picture of the scissors-like oscillation of proton and neutron subsystems.

In this work, the orbital and spin contributions to M1 transitions, as well as their mutual interference, are analyzed in detail. It is shown that both constructive and destructive interference between the orbital and spin parts of the M1 operator can occur in the low-energy spectrum of ^{254}No . This interference has a significant impact on the resulting $B(M1)$ values and on the physical interpretation of the corresponding states. In addition, the role of quadrupole oscillation, in particular the influence of $B(E2)$, on the overall dynamics of low-energy excitations is considered. Such a combined analysis of M1 and E2 characteristics allows a more reliable separation of genuine collective modes from states with large transition probabilities caused by the mixing of different microscopic structures.

The obtained results demonstrate that the interpretation of M1 excitations in superheavy deformed nuclei requires not only an analysis of integral $B(M1)$ values, but also a detailed investigation of the spin-orbital structure, transition densities, and velocity fields.

References

1. F. L. Bello Garrote [et al.], Phys. Lett. B **834**, 137479 (2022).
2. P.-G. Reinhard, B. Schuetrumpf, J. A. Maruhn, Comp. Phys. Commun. **258**, 107603 (2021).
3. A. Repko, J. Kvasil, V. O. Nesterenko, P.-G. Reinhard, arXiv:1510.01248[nucl-th].
4. V. O. Nesterenko, M. A. Mardyban, R.V. Jolos, P.-G. Reinhard, A. Repko, A. A. Dzhioev, Phys. Rev. C **111**, 064322 (2025).

Одночастичная структура изомерных состояний сферических ядер

А. М. Кострыгина^{1,2}, И. А. Митропольский^{1*}

¹НИИ Курчатовский институт – ПИЯФ, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: mitropolsky_ia@pnpi.nrcki.ru

Принято считать, что одночастичные возбуждения характерны для дважды магических ядер. Их структура описывается моделью независимых частиц в среднем поле ядра. В данной работе изучается одночастичная структура долгоживущих изомеров ($T_{1/2} > 1$ с) сферических ядер, связанных с орбиталями $1g_{9/2}$ и $1h_{11/2}$. Работа является продолжением систематики времен жизни ядерных изомеров [1], в которой феноменологически были выделены изомерные состояния, качественно отвечающие одночастичной модели.

Вероятность изомерного перехода

$$W(XL) = \frac{8\pi}{\hbar} \frac{L+1}{L[(2L+1)!!]^2} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^{2L+1} B(XL)$$

зависит от типа и мультипольности перехода XL , энергии перехода E и приведенной вероятности $B(XL)$, учитывающей структуру состояния. Для оценки в [1] использовалась модель однородного распределения ядерной плотности Вайскопфа. Подстановка в оценку экспериментальных значений среднеквадратичных радиусов [2] качественно не меняет результата.

Для вычисления радиальных интегралов, входящих в приведенные вероятности, мы выбрали среднее поле в виде потенциала Вудса-Саксона в параметризации [3], учитывающей зависимость потенциала от нейтронного избытка. Рассчитанные энергии возбуждения и зарядовые среднеквадратичные радиусы качественно соответствуют экспериментальным данным. Одночастичные волновые функции значительно увеличивают радиальные интегралы и приведенную вероятность, что в большинстве случаев улучшает согласие с наблюдаемым периодом полураспада изомеров.

Для большинства долгоживущих изомеров известны магнитные моменты [4]. Одночастичные магнитные моменты определяются только квантовыми числами состояний. В таблице приведен пример одночастичного описания свойств основного и изомерного состояния ^{89}Y (протоны) и ^{137}Ba (нейтроны). Экспериментальные значения магнитных моментов и периодов полураспада приведены справа.

Ядро	Основное состояние			Изомер					
	I^π	μ, μ_N		I^π	$E, \text{кэВ}$	μ, μ_N		$T_{1/2}, \text{с}$	
^{89}Y	$1/2^-$	-0,264	-0,137	$9/2^+$	909,0	6,79	6,37	26,9	15,7
^{137}Ba	$3/2^+$	1,148	0,936	$11/2^-$	661,7	-1,91	-0,99	216,4	153,1

В целом одночастичная модель качественно описывает как свойства изомеров в сферических ядрах, так и их изменения от ядра к ядру в широкой области.

Список источников

1. А. М. Кострыгина, И. А. Митропольский. Сборник тезисов LXXV Международной конференции «ЯДРО-2025», СПб., 2025. С. 39.
2. I. Angeli, K. P. Marinova. ADNDT, **99**, 69 (2013).
3. П. Э. Немировский, В. А. Чепурнов. ЯФ, **3**, 998 (1966).
4. N. J. Stone. Table of recommended nuclear magnetic dipole moments. IAEA, INDC(NDS)-0915 (2025).

Эмпирическая систематика периодов полураспада спонтанного деления и альфа-распада тяжелых и сверхтяжелых ядер

Н. С. Моисеев^{1,2}, Н. В. Антоненко^{1,2}, Г. Г. Адамян^{1*}

¹Лаборатория теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова,
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

*e-mail: adamian@theor.jinr.ru

Точный расчет периодов полураспада спонтанного деления и альфа-распада остается одной из ключевых задач ядерной физики, от решения которой зависит определение границ ядерной стабильности и понимание механизмов деления ядра. В работе проанализирована взаимосвязь между двумя модами распада для актинидов и сверхтяжелых ядер в основном состоянии.

Обнаружено, что отношение логарифмов периодов полураспада ведет себя регулярным образом в зависимости от зарядового числа Z , нейтронного числа N и массового числа A и остается почти постоянным для ядер вдоль цепочек альфа-распада, у которых нейтронный избыток $N - Z$ одинаков. На основе найденных закономерностей предложена эмпирическая формула, напрямую связывающая период полураспада спонтанного деления $T_{1/2}^{\text{SF}}$ с периодом полураспада альфа-распада $T_{1/2}^{\alpha}$ и величиной $N - Z$ [1]. Формула содержит всего три подгоночных параметра и дает единое описание для ядер разной четности без введения отдельных факторов запрета, воспроизводя экспериментальные $T_{1/2}^{\text{SF}}$ для 78 ядер в диапазоне $90 \leq Z \leq 114$ со средним абсолютным отклонением 0,94 порядка.

Выполнено сравнение предсказанных значений $T_{1/2}^{\text{SF}}$ с расчетами по микроскопически-макроскопическим и самосогласованным микроскопическим моделям и с результатами других эмпирических формул. Предложенная формула может быть применена для предсказания $T_{1/2}^{\text{SF}}$ еще не полученных в эксперименте ядер, а также дает количественный критерий для определения доминирующей моды распада и может служить инструментом для обнаружения аномалий, таких как изомерные состояния.

Обнаруженная систематика периодов полураспада подтверждает фундаментальную связь между спонтанным делением и альфа-распадом как различными проявлениями деления ядра, что согласуется с моделью двойной ядерной системы [2].

Список источников

1. N. S. Moiseev, N. V. Antonenko, G. G. Adamian, Phys. Rev. C **113**, 054608 (2026).
2. I. S. Rogov, N. V. Antonenko, G. G. Adamian, EPJ Web of Conferences. **194**, 06005 (2018).

Transition densities of spin-dipole excitations in ^{208}Pb

I. V. Molodtsova

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: molod@theor.jinr.ru

In recent papers [1], [2] the electric and magnetic spin-dipole responses of heavy even-even axial deformed and spherical nuclei were studied within the framework of the Wigner Function Moments (WFM) method. The energies and transition probabilities of $E1$ and spin $M2$ excitations of ^{164}Dy [1], ^{90}Zr and ^{208}Pb [2] were calculated. It was found that the spin degrees of freedom give rise to the isovector Electric Spin Dipole Resonance (ESDR). The ESDR is low-energy satellite of the isovector Giant Dipole Resonance (GDR) and is not excited if the spin-orbit potential is neglected.

The present work extends previous results by investigating transition densities. We analyze the transition densities associated with 1^- and 2^- excitations of ^{208}Pb . The main interest is to study the interplay of spin-flip and spin-scalar contributions to $E1$ transitions. It was found that the out-of-phase translational motion of protons and neutrons dominates for both, GDR and ESDR. The corresponding displacements are localized in the surface layer of the nucleus. The contribution from spin-flip is also localized primarily near the surface. However, there is also an appreciable contribution from the interior region. In the case of the ESDR, the overall contribution of spin-flip is significantly more pronounced compared to that obtained for GDR. Transition densities for isoscalar and isovector magnetic spin-dipole 2^- excitations are also discussed.

References

1. E. B. Balbutsev, I. V. Molodtsova, *Natural Sci. Rev.* **3**, 100703 (2026).
2. E. B. Balbutsev, I. V. Molodtsova, *Int. J. Mod. Phys. E* **35**, 2641007 (2026).

**Экспериментальная и расчетная зависимости коэффициента
внутренней конверсии электрон-позитронной пары
от угла их разлета при испускании ее из высоковозбужденного ядра $^8\text{Be}^*$**

Е. А. Пермяков*, С. И. Поташев, И. А. Мазур, А. А. Каспаров, С. Х. Караевский

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: zhenya-10000@yandex.ru

На быстрых нейтронах канала РАДЭКС ИЯИ РАН был проведен эксперимент по исследованию реакции взаимодействия нейтрона с ядром ^{10}B . В результате эксперимента была получена зависимость коэффициента внутриядерной конверсии с рождением электрон-позитронной пары от угла разлета e^+ и e^- пары в диапазоне от 110° до 129° . Эксперимент проводился на установке [1], состоящей из нового позиционно-чувствительного детектора-мишени ^{10}B и двухплечевого спектрометра e^+ и e^- пар, каждое плечо которого состоит из позиционно-чувствительного кремниевого детектора и сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI. В полученных данных были идентифицированы события с рождением и распадом возбужденных состояний ядра $^8\text{Be}^*$ с энергиями 17.64 МэВ ($J^\pi = 1^+$; $T = 1$) и 18.15 МэВ ($J^\pi = 1^+$; $T = 0$) с помощью анализа, разработанного нами метода корреляции амплитуд сигналов от ядра-спектатора ^3H [2]. Результаты сравниваются с расчетной зависимостью с учетом порога регистрации электрона и позитрона и данными других авторов [3].

Список источников

1. S. Kh. Karaevsky [et al.], Instr. Exp. Tech. **68**, 360 (2025).
2. S. I. Potashev [et al.], Phys. Atom. Nucl. **88**, 383 (2025).
3. J. Gulyas [et al.], NIM A **808**, 21 (2016).

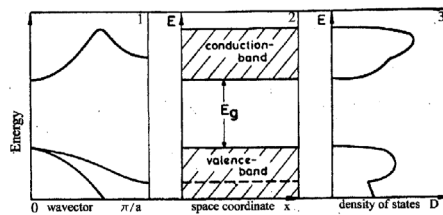
Measuring the dependence of proton-neutron interaction on the distance between them

V. G. Plekhanov

Fonoriton Sci. Lab., GaronLtd., Tallinn, Estonia

e-mail: vgplekhanov@gmail.com

The well-known coefficient found in electrostatic model - the binding energy of a proton with an electron in a free hydrogen atom (13.6 eV) – is contained in any book on atomic physics. The stable state of an atomic nucleus consisting of a proton and a neutron (two-particle problem) is described by short-range (10^{-15} m) Yukawa potential of non-electromagnetic nature, but does not describe intranuclear dynamics. The – short range potential nature indicated the absence of act of hadrons on leptons, although already in the 1930s the neutron-electron in the mass isotope effect was theoretically studied (Tamm, Condon). using the optical spectroscopy method we measured the neutron-electron binding energy as its dependence on the distance between nucleons in low-temperature (2K) intrinsic luminescence of unique LiH (without strong interaction in the hydrogen nucleus) and LiD (with strong interaction in the deuterium nucleus) crystals, which differ by one neutron. Considering that the value of E_g (the binding energy of a proton and an electron) is the same in LiH and LiD crystals, the increase in E_g in LiD is caused by the addition of a neutron to the hydrogen nucleus (see Figure). In this case the difference between zero phonon emission lines in LiD and LiH crystals is equal to the neutron-electron binding energy of 0,103 eV. Similarly, early it was shown that the neutron-electron binding energy in diamond is equal to 105 ± 3 meV.



Using subatomic physics to interpret the results of measuring the strong interaction from the distance between the proton and neutron in the deuterium nucleus in LiD crystals allows us to estimate the energy of the boson responsible for the interaction of the neutron and electron and secondly to calculate the coupling constant of the strong interaction at different values of the binding energy. For an interaction radius equals to the Bohr radius $a_0 = 0,52917706 \cdot 10^{-10}$ m, the Yukawa potential gives a boson mass value of $\approx 3,7$ keV. The obtained nonlinear dependence of the strong interaction coupling constant on the neutron-electron binding energy is associated with the manifestation of a new force in the mass isotope effect, previously not observed.

Изоспиновое расщепление гигантского дипольного резонанса на средних и тяжелых ядрах

Ф. А. Расулова^{1,2*}, А. А. Кузнецов^{3,4}, В. О. Нестеренко⁵, Ж. Х. Хушвактов^{2,5}, С. И. Алексеев¹,
Н. Ю. Фурсова^{3,4}, А. Ш. Мадумаров¹, И. Чупраков^{1,7}, С. С. Бельшев^{3,4}, Н. В. Аксенов¹

¹ Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики

Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет имени Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Лаборатория теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

⁶ Лаборатория ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

⁷ Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан

*e-mail: rasulova@jinr.ru

В данной работе эксперименты проводились при энергиях конечной точки тормозного излучения 10–23 МэВ с пучком из микротрона МТ-25 ЛЯР ОИЯИ с использованием метода γ -активации. Энергии электронов находились в диапазоне 10–23 МэВ с шагом энергии 1 МэВ. Для получения γ -излучения использовалась мишень-радиатор из вольфрама. Наведенная активность в облученных мишенях из природной смеси Se [1], Mo [2], Cd [3], Te [3], Sm, Gd, Dy, Yb, Hf, и Pt [4] измерялась с использованием германиевого γ -детектора высокой чистоты, экспериментальные выходы реакций нормировались на выход реакций $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81}\text{Se}$, $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}$, $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}$, $^{154}\text{Sm}(\gamma, n)^{153}\text{Sm}$, $^{160}\text{Gd}(\gamma, n)^{159}\text{Gd}$, $^{158}\text{Dy}(\gamma, n)^{157}\text{Dy}$, $^{176}\text{Yb}(\gamma, n)^{175}\text{Yb}$, $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$ и $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197}\text{Pt}$, соответственно. В результате экспериментов впервые получены экспериментальные значения относительных выходов реакций (γ, n) и (γ, p) , образующих ядра $^{73,75,81}\text{Se}$, $^{91,99}\text{Mo}$, $^{105,107,109,111m,115}\text{Cd}$, $^{119,121,123m,125m,127,129}\text{Te}$, $^{143,153}\text{Sm}$, $^{151,153,159}\text{Gd}$, $^{155,157}\text{Dy}$, $^{167,169,175}\text{Yb}$, $^{173,175,180m}\text{Hf}$, $^{189,191,193m,195m,197}\text{Pt}$ и $^{73,76,77,79}\text{As}$, $^{91m,95,96,97}\text{Nb}$, $^{105,111,112,113,115}\text{Ag}$, $^{122,124,127,129}\text{Sb}$, $^{143,148g,148m,149,151}\text{Pm}$, $^{156,157,159}\text{Eu}$, $^{160,161,162,163}\text{Tb}$, $^{172,173,175}\text{Tm}$, $^{176m,177,178,179}\text{Lu}$, $^{194,195}\text{Ir}$.

Экспериментальные значения относительных выходов сравнивались с теоретическими результатами, полученными на основе TALYS со стандартными параметрами [5] и комбинированной модели фотонуклонных реакций (КМФР) [6]. В случае относительных выходов для фотопротонных реакций на тяжелых изотопах теоретические значения, рассчитанные с использованием КМФР, значительно превышают результаты TALYS. Экспериментально полученные результаты лежат ближе к теоретической кривой по коду КМФР. Учет изоспинового расщепления в КМФР позволяет описать экспериментальные данные по реакциям с вылетом протонов в диапазоне энергий от 12 до 23 МэВ.

Список источников

1. F. A. Rasulova [et. al.], Chin.Phys. C **48**, 024002 (2024).
2. F. A. Rasulova [et. al.], Phys. Rev. C **111**, 024604 (2025).
3. F. A. Rasulova [et. al.], Chin.Phys.C **50**, 064003 (2026).
4. F. A. Rasulova [et. al.], Phys. Rev. C **112**, 054610 (2025).
5. A. Koning. TALYS-2.0: A Nuclear Reaction Program, User Manual (2023).
6. B. S. Ishkhanov, V. N. Orlin, Phys. Atom. Nucl. **78**, 557 (2015).

Properties of two-nucleon momentum distributions for A=6 nuclei found within three-cluster model

V. N. Pomerantsev^{1*}, M. B. Kakenov², O. A. Rubtsova¹

¹Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: pomeran@nucl-th.sinp.msu.ru

Nuclei with A=6 are suitable objects for studying the properties of nucleon pairs in nuclear medium [1]. Different characteristics of the above nuclei are sensitive to either asymptotic or short-range properties of the NN interaction. Thus, a comparative analysis of these systems provides important information about nucleon pairs with different isospins. At the same time, the halo structure allows one to employ the three-cluster model αNN for practical calculations.

In this research, we calculate three-body wave functions for nuclei with A=6 in the three-body Gaussian basis using realistic models for the NN interaction including the dibaryon model, which takes into account non-nucleonic degrees of freedom [2]. Different two-nucleon characteristics are calculated including the halo radii for the valence nucleons for the ground states of ${}^6\text{Li}$ and ${}^6\text{He}$ as well as for the excited state ${}^6\text{Li}$ (0+1). It is shown that the sizes of the halo weakly depend on the models of the NN interaction used and their values, found from a three-cluster model, are consistent with existing experimental data and theoretical results obtained from six-nucleon calculations. Additionally, a comparative analysis of the bound states of ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ (0+1) with the same isospins has been used to estimate the value of neutron-neutron scattering length.

To study the problem of short-range correlations (SRC) of nucleons, the two-nucleon momentum distributions for the above nuclei are found. In particular, the nuclear contacts for the valence NN -pairs are calculated as well. Finally, we find two-nucleon spectral functions and respective joint two-nucleon momentum distributions, which enter the inelastic cross sections for quasifree scattering of different projectiles on ${}^6\text{Li}$ and ${}^6\text{He}$ [3], [4] with emission of two nucleons, interacting in final state. Obtained distributions are compared with existing experimental data [3].

References

1. M. Kakenov, V. I. Kukulin, V. N. Pomerantsev, O. Bayakhmetov, Eur. Phys. J. A **56**, 266 (2020).
2. V. I. Kukulin [et al.], Chin. Phys. C **46**, 114106 (2022).
3. R. E. Warner [et al.], Phys. Rev. C **42**, 2143 (1990).
4. S. I. Sidorchuk [et al.], Nucl. Phys. A **840**, 1 (2010).

Study of spatial structures in α -cluster nuclei with valence neutrons

V. Samarin^{1,2}

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² Dubna State University, Dubna, Russia

e-mail: samarin@jinr.ru

The Feynman Path Integral method using parallel computing based on NVIDIA CUDA technology was used earlier for calculations of the probability densities and energies of the ground states for α -cluster nuclei ^{12}C (3α), ^{16}O (4α), ^{20}Ne (5α), ^{24}Mg (6α), ^{28}Si (7α) and for nuclear molecules ^9Be ($2\alpha + n$), ^{10}Be ($2\alpha + 2n$), ^{13}C ($3\alpha + n$), ^{14}C ($3\alpha + 2n$) [1–4]. This approach is applied for studying spatial structures in heavier α -cluster nuclei with valence neutrons ^{17}O ($4\alpha + n$), ^{18}O ($4\alpha + 2n$), ^{21}Ne ($5\alpha + n$), ^{22}Ne ($5\alpha + 2n$), ^{25}Mg ($6\alpha + n$). The nuclear parts of pairwise potential $V_{\alpha-\alpha}$ and pairwise pseudopotential $V_{\alpha-n}$ have hard central cores and are the combinations of Woods–Saxon functions. In work [5], it was shown that the two- α -cluster core is retained in the ^9Be nucleus, while in the ^{10}Be nucleus, two extra neutrons “destroy” the α -cluster structure. The results of the calculations demonstrate that this conclusion is true for the studied nuclei as well. In addition, the structures of the ^{17}O (the experimental quadrupole deformation parameters is $\beta_2 = -0,905 \pm 0,15$, [6]), ^{18}O ($\beta_2 = +0,152 \pm 0,046$, [6]), ^{20}Ne ($\beta_2 = +0,741 \pm 0,134$, [6]), ^{21}Ne ($\beta_2 = +0,463 \pm 0,059$, [6]), ^{22}Ne ($\beta_2 = +0,585 \pm 0,152$, [6]), ^{24}Mg ($\beta_2 = +0,172 \pm 0,082$, [6]) ^{25}Mg ($\beta_2 = +0,388 \pm 0,025$, [6]), ^{26}Mg ($\beta_2 = +0,331 \pm 0,086$ [6]) nuclei are calculated using the shell model of strongly deformed nuclei. The Schrödinger equation is solved taking into account the spin-orbit interaction using the expansion in Bessel series [7]. Close agreement of the calculated radial charge densities and root-mean-square charge radii with experimental data is obtained for the shell-model mean-field potential corresponding to the α -cluster model.

References

1. V. V. Samarin, Eur. Phys. J. A **58** (2022).
2. V. V. Samarin, J. Phys. Conf. Ser. **1555**, 012030 (2020).
3. V. V. Samarin, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **84**, 981 (2020).
4. V. V. Samarin, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **86**, 901 (2022).
5. A. A. Ogloblin, Sov. J. Part. Nucl. **3**, 936 (1972).
6. Chart of nucleus shape and size parameters ($1 \leq Z \leq 15$). URL: <http://cdfc.sinp.msu.ru/cgi-bin/muh/radchartnucl.cgi?zmin=1&zmax=15&zch=0&fz=12&tdata=123456>.
7. V. V. Samarin, Phys. Part. Nucl. **57**, 217 (2026).

The β -delayed γ -transitions of neutron-rich nuclei

A. P. Severyukhin^{1*}, N. N. Arsenyev¹, V. A. Severyukhina^{1,2}

¹Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

*e-mail: sever@theor.jinr.ru

One of the successful tools for nuclear structure studies is the quasiparticle random phase approximation (QRPA) with the self-consistent mean-field derived from the Skyrme energy density functional (EDF). The framework allows to relate the properties of the ground states and excited states through the EDF. There is the discrepancy between the QRPA predictions and the measurements for low-energy 1^+ spectrum of the daughter nucleus, see as an example [1].

The number of low-lying 1^+ states is naturally reproduced by the inclusion of the tensor correlations and the coupling between one- and two-phonon terms in the 1^+ wave functions [2], [3], [4]. We applied the influence of the phonon-phonon coupling on the probability of the neutron emission occurring at very small quantity of energy available in β -decay. Onset of delayed neutron emission in the chains of neutron-rich isotopes is discussed.

The research was supported within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, topic No. 6 «Nuclear and Radiation Physics» (stage 2023–2025).

References

1. A. Etilé [et al.], Phys. Rev. C **91**, 064317 (2015).
2. A. P. Severyukhin [et al.], Phys. Rev. C **90**, 044320 (2014).
3. A. P. Severyukhin [et al.], Phys. Rev. C **95**, 034314 (2017).
4. A. P. Severyukhin [et al.], Phys. Rev. C **101**, 054309 (2020).

Skyrme-type energy density functional with surface-peaked effective mass

D. Yu. Smoliannikov^{1,2*}, N. N. Arsenyev¹, A. P. Severyukhin¹, I. T. Usman²

¹Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: dsmoliannikov@theor.jinr.ru

The Skyrme energy density functional (EDF) employing the Hartree-Fock (HF) approximation is a highly effective method for investigating the ground-state properties of nuclei throughout the whole periodic table [1]. The Skyrme-HF calculations face a fundamental problem in describing the density of single-particle (s.p.) states near the Fermi surface (see discussions in Refs. [2], [3]). The inclusion of terms proportional to $\tau(\nabla\rho)^2$ and $\rho^2(\nabla\rho)^2$, which influence the radial dependence of the nucleon effective mass at the nuclear surface, results in an increase in the single-particle level density close to the Fermi surface. It should be noted that enhancing this radial dependence negatively affects the accuracy of binding energy descriptions. The contributions of various terms to the nucleon effective mass on the global nuclear properties (binding energies, s.p. spectrum, charge radii, and especially differences of radii) of magic nuclei ^{16}O , ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{56}Ni , ^{100}Sn , ^{132}Sn , and ^{208}Pb has been considered [4]. Based on the analysis performed, two parameter sets (SLy4* and SLy4**) have been proposed for a Skyrme-type EDF including terms proportional to $\tau(\nabla\rho)^2$ and $\rho^2(\nabla\rho)^2$. A comparison of the calculation results with available experimental data demonstrates improved description of the s.p. level density near the Fermi surface, while maintaining the reliability of the description of ground-state properties of nuclei and infinite nuclear matter. We discuss the effect of the radial dependence of the nucleon effective mass at the nuclear surface on energies and transition probabilities for the low-lying quadrupole and octupole states in the neutron-rich Sn isotopes.

The research was supported within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, topic No. 6 «Nuclear and Radiation Physics» (stage 2023–2025).

References

1. P. F. Bortignon, A. Bracco, R. A. Broglia, Giant Resonances: Nuclear Structure at Finite Temperature / Harwood Academic, Amsterdam, 1998.
2. J. Carter [et al.], Phys. Lett. B **833**, 137374 (2022).
3. I. T. Usman [et al.], Phys. Rev. C **94**, 024308 (2016).
4. A. Bahini [et al.], Phys. Rev. C **109**, 014325 (2024); Nucl. Phys. A **1059**, 123078 (2025).
5. N. N. Arsenyev, A. P. Severyukhin, R. G. Nazmitdinov, JETP Lett. **118**, 718 (2023).
6. Z. Z. Li, Y. F. Niu, G. Coló, Phys. Rev. Lett. **131**, 082501 (2023).
7. A. P. Severyukhin, S. Åberg, N. N. Arsenyev, R. G. Nazmitdinov, Phys. Rev. C **95**, 061305 (2017).
8. N. N. Arsenyev, I. T. Usman, A. P. Severyukhin, Bahini, Int. J. Mod. Phys. E **36**, 2641012 (2026).

Экспериментальные исследования и теоретическое обоснование изомерии и структуры нечетно-нечетных ядер гольмия и европия в переходной области деформаций (N=89–93)

В. Г. Калинин¹, С. П. Авдеев¹, Е. В. Бармина², О. В. Белов¹, Ю. А. Ваганов¹,
В. Карч¹, В. Г. Картавенко¹, В. В. Кобец¹, С. В. Розов¹, А. А. Симакин²,
В. И. Стегайлов^{1*}, Щербаков И. А.², Н. Г. Шакун¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
²Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия
*e-mail: stegajlov2013@yandex.ru

В докладе изложены результаты многолетних исследований на экспериментальных комплексах ЛЯП ОИЯИ и ЛФВЭ ОИЯИ, созданных на базе ускорителей ОИЯИ. Измерения проводились в «on-line» и «off-line» режимах [1–7]. Целью экспериментов является исследование структуры ядер методами ядерной спектроскопии, изомерии, схем распада и каналов радиоактивного распада ядер гольмия (Z=67) и ядер европия (Z=63) (таблица).

Рассмотрена методика экспериментов, как на комплексе ЯСНАПП, так и при облучении на прямых пучках ускорителей ОИЯИ. В докладе обсуждаются каналы распада девяти открытых в ходе исследований изомеров ядер гольмия на уровни ядер диспрозия. Исследуется распад нового изомера.

$T_{1/2}=(5,2+_{-1,0})$ мин в ядре ^{160}Ho . В экспериментах исследовались механизмы влияния лазерного излучения на вероятность радиоактивного распада ядер, в том числе на примере распада хорошо изученного ядра ^{152}Eu . В рамках современных моделей ядра проведен теоретический анализ экспериментальных результатов.

ТАБЛИЦА ОТКРЫТЫХ ИЗОМЕРОВ В ЯДРАХ ГОЛЬМИЯ С A=156-160 (Z=67)

$^{160}_{67}\text{Ho}_{93}$	$Q_{\text{EC}}=330\pm30$ KeV	$T_{1/2}^{160}\text{Ho}_{(g.s.)}=25.6\text{min};$ $E_{\text{yp}}=60\text{keV}, 2^{-}, T_{1/2}=5.02\text{h}$ 1. $T_{1/2}^{9+160\text{m}2}\text{Ho}=(3.2\pm0.2)\text{s}$ 2. $T_{1/2}=(5.2+1.0)\text{min}$ 3. $E_{\text{yp}}=67\text{keV}, t_{1/2}=(28\pm2)\text{ns}$	on line и off line ЯСНАПП 2
$^{158}_{67}\text{Ho}_{91}$	$Q_{\beta^{+}}=890\pm30$ keV	$T_{1/2}^{158}\text{Ho}_{(g.s.)}=11\text{min};$ $E_{\text{yp}}=67\text{keV}, 2^{-}, T_{1/2}=27\text{min}$ * 1. $T_{1/2}^{9+158\text{m}2}\text{Ho}=(21+1.0)\text{min}$ 2. $E_{\text{yp}}=147\text{keV}, t_{1/2}=1.8\pm0.2\text{ns}$ 3. $E_{\text{yp}}=92\text{keV}, t_{1/2}=(140\pm25)\text{ns}$ 4. $E_{\text{yp}}=75\text{keV}, T_{1/2}=(58\pm3)\text{ns}$	on line и off line ЯСНАПП 2
$^{156}_{67}\text{Ho}_{89}$	$Q_{\beta^{+}}=1410\pm15$ KeV	$T_{1/2}^{156}\text{Ho}_{(g.s.)}=56\text{min};$ $E_{\text{yp}}=52\text{keV}, 1^{-}, T_{1/2}=(9.5\pm1.5)\text{s}$ 1. $T_{1/2}^{9+156\text{m}2}\text{Ho}=(7.25\pm0.35)\text{min}$ * 2. $E_{\text{yp}}=118\text{keV}, t_{1/2}=(58\pm3)\text{ns}$ 3. $E_{\text{yp}}=82\text{keV}, t_{1/2}=1.3\pm0.1\text{ns}$	on line и off line ЯСНАПП 2

Список источников

1. S. I. Tyutyunnikov, V. I. Stegailov, V. G. Kalinnikov и др. // Тез. докл. межд. конф. по ядерной физике. Саров, 2006. С. 82–83.
2. E. V. Barmina, A. V. Simakin [et al.], Quantum Electronics. **47(7)**, 627 (2017).
3. S. I. Tyutyunnikov, V. I. Stegailov [et al.], Nucleus-2023. Sarov. P. 17. (2023).
4. S. Kilim, S. I. Tyutyunnikov, V. I. Stegailov [et al.], NUKLEONIKA. **63(1)**, 17 (2018)

Исследование структуры ядер с квадруполь-октупольной деформацией

Д. Е. Стовец^{1,2*}, Р. В. Джолос^{1,2}

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, филиал в Дубне, Россия

*e-mail: stovpets@theor.jinr.ru

Целью настоящей работы является исследование свойств низколежащих состояний тяжёлых чётно-чётных ядер, в структуре которых важную роль играют как квадрупольные, так и октупольные степени свободы. Работа базируется на результатах опубликованных расчётов коллективного потенциала ряда ядер из области актинидов, зависящего от β_2 и β_3 [1], [2], [3]. Эти расчёты указывают на то, что в плоскости β_2 - β_3 можно выделить «мягкую» моду, для которой характерна большая амплитуда колебаний. Для простоты на данном этапе не учитывается эффект неаксиальной деформации. В работе численно точно решается задача нахождения собственных значений и собственных функций, затем исследуется возможность простой аналитической аппроксимации полученных результатов.

Результатом является расчёт зависимости расщепления по четности в энергиях возбуждения состояний основной ротационной полосы и вероятностей E1 и E2 переходов между этими состояниями.

Список источников

1. R. V. Jolos, E. A. Kolganova, E. V. Mardyban, T. M. Shneidman, Int. J. Mod. Phys. E **33**(10), 2340002 (2023).
2. M. S. Nadirbekov, N. Minkov, Int. J. Mod. Phys. E **27** (8) 1850069 (2018).
3. R. V. Jolos, Yu. V. Palchikov, V. V. Pashkevich, A. V. Unzhakova, Nuovo Cim. A **110** (1997).

Остаточное нейтрон-протонное взаимодействие и локальные массовые соотношения

Т. Ю. Третьякова^{1,2*}, С. В. Сидоров², М. Е. Степанов¹, К. А. Стопани²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Россия

*e-mail: tretyakova@sinp/msu.ru

Рассмотрены различные массовые соотношения, предложенные в литературе для описания нейтрон-протонных корреляций в атомных ядрах. Наиболее активно обсуждается соотношение δV_{np} на основе энергии отделения пары протонов (или нейтронов), характеризующее усредненную энергию np -взаимодействия в четно-четных ядрах [1], [2]. С использованием компиляции масс атомных ядер AME2020 [3] мы анализируем поведение δV_{np} для ядер с различной четностью N и Z , а также рассматриваем другие массовые соотношения, связанные непосредственно с взаимодействием нечетных протона и нейтрона [4]. Результаты для соотношения δV_{np} на всем массиве данных не зависят от четности числа нейтронов или протонов, характерные особенности наблюдаются в области заполнения оболочек. Наиболее яркое отклонение от общих зависимостей возникает в области $N = Z$, где np -взаимодействие интерпретируется как спаривание нейтрона и протона с $T = 0$.

Мы также провели тестирование различных теоретических моделей с точки зрения воспроизведения массовых соотношений. Наиболее адекватное воспроизведение взаимодействия нечетных протона и нейтрона достигается в модели FRDM [5], где непосредственно введена поправка на np -взаимодействие в нечетно-нечетных ядрах. Учета спаривания тождественных нуклонов, присутствующего в микроскопических моделях, недостаточно для описания np -корреляций.

Список источников

1. J.-Y. Zhang, R. F. Casten, D. S. Brenner, Phys. Lett. B **227**, 1 (1989).
2. D. D. Warner, M. A. Bentley, P. Van Isacker, Nature Physics. **2**, 311 (2006)
3. Meng Wang [et al.], Chinese Phys. C **45**, 030003 (2021)
4. B. S. Ishkhanov [et al.], Chinese Phys. C **43**, 014104 (2018)
5. P. Moller, A. J. Sierk, T. Ichikawa, H. Sagawa, At. Dat. Nucl. Dat. Tabl., **109**, 1 (2016)

Коэффициенты $\delta(E2/M1)$ для переходов из вибрационных состояний в $^{182,184}\text{W}$

П. Н. Усманов^{1,*}, И. Н. Изосимов², Э. К. Юсупов¹, Ж. Б. Махмудов¹

¹Наманганский государственный технический университет, Наманган, Узбекистан

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: usmanov1956.56@mail.ru

В работе [1], [2] в рамках феноменологической модели [3], [4], [5], исследованы энергетические и электрические характеристики состояний положительной четности ядер $^{182,184}\text{W}$. При этом учитывалось кориолисово смешивание состояний низколежащих ротационных полос с полосами, имеющими квантовую характеристику $K^\pi = 1^+$. Мы продолжили изучение свойств ротационных состояний ядер $^{182,184}\text{W}$. Используя волновые функции, полученные в [1], [2], рассчитали приведенные вероятности M1-переходов и другие магнитные характеристики возбужденных состояний. В частности, изучается влияние уровней $K^\pi = 1^+$ полос на магнитные характеристики низколежащих состояний. В таблице представлены вычисленные значения коэффициентов смеси мультиполей δ для переходов из состояний γ - и β -полос для ядра ^{182}W , которые сравниваются с экспериментальными данными [6]. Таблица показывает, что модель описывает M1-переходы из состояний как γ -, так и β -полос.

Коэффициенты смеси мультиполей δ для переходов из состояний гамма и бета полос ^{182}W

$I_i K_i$	$I_f K_f$	E_i MeV	E_f MeV	δ exp. [6]	δ theor.
2^+2_1	2^+0_1	1,221	1,121	30^{+6}_{-4}	5,3
3^+2_1	2^+0_1	1,3311	1,231	-33^{+6}_{-9}	6,7
3^+2_1	4^+0_1	1,3311	1,0017	$-8,9^{+21}_{-18}$	4,8
3^+2_1	2^+2_1	1,3311	0,1001	—	0,53
4^+2_1	4^+0_1	1,4428	1,1134	$+5,6^{+13}_{-10}$	2,4
5^+2_1	4^+0_1	1,6235	1,2943	>30	5,1
5^+2_1	6^+0_1	1,6235	0,9431	—	3,2
5^+2_1	4^+2_1	1,6235	0,1133	$+0,36(1)$	$+0,35$
6^+2_1	6^+0_1	1,769	1,0886	$0,4(2)$	1,6
8^+2_1	8^+0_1	2,180	1,0357	—	1,2
2^+0_2	2^+0_1	1,2574	1,1573	-9^{+3}_{-6}	-4,5
4^+0_2	4^+0_1	1,5102	1,1808	$-2,8(10)$	-9,9

Список источников

1. П. Н. Усманов [и др.], Уз. Физ. Жур. **27**, 1 (2025).
2. П. Н. Усманов [и др.], Изв. РАН Сер. физ., **90**, (2026) в печати.
3. P. N. Usmanov [et al.], Phys. Part. Nucl. **28**, 348 (1997).
4. P. N. Usmanov [et al.], Phys. Part. Nucl. Letters. **19**, 706 (2019).
5. P. N. Usmanov [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **84**, 968 (2020).
6. S. Balraj, Nucl. Data Sheets. **130**, 21 (2015).

Мюонный захват на ядре ^{136}Ba

М. В. Фомина (от коллаборации MONUMENT)

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

e-mail: fominamv@jinr.ru

Мюонный захват атомными ядрами – эффективный инструмент для решения широкого спектра задач фундаментальной физики. Высокие передаваемые импульсы в этом процессе делают его уникальным инструментом для тестирования ядерных моделей и определения констант слабого взаимодействия, что важно для исследования двойного безнейтринного бета-распада.

В рамках эксперимента MONUMENT [1] проводится изучение характеристик мюонного захвата. Экспериментальный метод основан на анализе время-энергетических распределений и интенсивностей линий задержанного гамма-излучения, возникающего после захвата мюона ядром. Серия измерений выполнена на пучке $\pi E1$ мезонной фабрики Института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария), высокая монохроматичность и широкий диапазон регулировки момента которого обеспечивает необходимую точность результатов за короткое время измерительной кампании.

В докладе представлены принцип измерения, устройство экспериментальной установки и впервые полученное экспериментальное значение полной скорости мюонного захвата на обогащенной мишени ^{136}Ba .

Список источников

1. G. R. Araujo, M. V. Fomina [et al.], Eur. Phys. J. C **84**, 1188 (2024).

Фотоядерные реакции на природном молибдене при энергии тормозного излучения 25 МэВ

А. В. Чуйкина^{1,2,4}, А. А. Кузнецов^{2,3,4}, Н. Ю. Фурсова³

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Саров, Россия
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Экспериментальное исследование фотоядерных реакций на природном молибдене позволяет изучать возбуждение и распад гигантского дипольного резонанса (ГДР), включая его изоспиновое расщепление на $T_<$ и $T_>$ компоненты, а также механизмы девозбуждения составных ядер. Изотопы ^{94}Mo и ^{92}Mo относятся к группе обойденных ядер, содержание которых во Вселенной не объясняется стандартными процессами медленного и быстрого захвата нейтронов, что обуславливает их интерес для ядерной астрофизики [1]. Однако данные разных лабораторий по сечениям фотоядерных реакций существенно расходятся, а для многих энергий гамма-квантов информация отсутствует либо недостаточна, что затрудняет верификацию моделей ГДР и расчеты нуклеосинтеза.

В настоящей работе при максимальной энергии тормозного излучения 25 МэВ были определены выходы и сечения на эквивалентный квант долгоживущих изотопов молибдена и ниобия. Эксперимент проводился гамма-активационным методом на линейном ускорителе электронов с максимальной энергией электронов 35 МэВ. Для генерации тормозного излучения использовалась вольфрамовая мишень толщиной 2,1 мм. Исследуемая мишень, представлявшая собой металлическую пластину природного изотопного состава молибдена (4×4 см, толщиной 0,3 мм) облучалась в течение 30 минут. Мониторная мишень из меди служила для нормировки измеренных выходов на интегральный поток тормозного излучения по реакциям $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$. Спустя примерно 21 час начиналось измерение спектров активности, наведённой в облученной мишени.

На основе площадей фотопиков в спектрах наведённой активности были определены выходы и сечения на эквивалентный квант долгоживущих изотопов ($^{95\text{m,g}}\text{Nb}$, $^{92\text{m}}\text{Nb}$, $^{91\text{m}}\text{Nb}$ и ^{99}Mo), полученных при облучении тормозным излучением. Образование этих долгоживущих изотопов ниобия преимущественно происходит в каналах с вылетом одного или нескольких протонов ($\text{natMo}(\gamma, p)$, (γ, np) и др.), что открывает возможность для изучения изоспинового расщепления ГДР. Полученные результаты сопоставлены с расчетами по программе TALYS 2.2 [2] и с расчетами использованием комбинированной модели фотонуклонных реакций (КМФР) [3], [4], а также с данными предыдущих экспериментальных работ других групп при различных энергиях тормозного излучения.

Список источников

1. M. Arnould, S. Goriely, Phys. Rep. **384**, № 1-2, 1 (2003).
2. A. Koning et al., Eur. Phys. J. A **59**, 131 (2023).
3. Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, ЯФ. **74**, 21 (2011). [B. S. Ishkhanov, V. N. Orlin. Phys. Atom. Nuclei. **74**, № 1, 19 (2011)].
4. Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, ЯФ. **78**, 601 (2015). [B.S. Ishkhanov, V. N. Orlin. Phys. Atom. Nuclei **78**, 557 (2015)].

Neural Network Extrapolation of NCSM Results for the ^{17}C Nuclear Spectrum

R. E. Sharypov^{1*}, A. I. Mazur¹, A. M. Shirokov², He Li³

¹M. P. Danilovsky Pacific National University, Khabarovsk, Russia

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, China

*e-mail: 2017104939@togudv.ru

Using an *ab initio* approach, we investigate the spectrum of the ^{17}C nucleus. The energies of the ground and excited states are calculated within the no-core shell model (NCSM) [1] employing the realistic nucleon-nucleon interaction Daejeon16 [2]. The NCSM calculations are performed in model spaces including all many-body states with excitation quanta $N_{\text{max}} = 2, 4, 6$ for positive-parity states and $N_{\text{max}} = 3, 5, 7$ for negative-parity states.

To extrapolate the NCSM results to infinite model spaces, we employ an approach based on ensemble of neural networks [3]. This approach has been successfully used to extrapolate the energies and root-mean-square radii of proton, neutron, and matter distributions for the ground and excited states of light nuclei with $A = 6$ [4].

The extrapolated values for the ground-state energy and low-lying states of the ^{17}C nucleus agree with experimental data.

This work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FEME-2024-0005).

References

1. R. Barrett, P. Navrátil, J. P. Vary, Prog. Part. Nucl. Phys. **69**, 131 (2013).
2. A. M. Shirokov et al., Phys. Lett. B **761**, 87 (2016).
3. A. I. Mazur, R. E. Sharypov, A. M. Shirokov, Mosc. Univ. Phys. Bull. **79**, 318 (2024).
4. R. E. Sharypov, A. I. Mazur, A. M. Shirokov, JETP Letters. **122**, 551 (2025).

Секция 2
Экспериментальные
и теоретические исследования
ядерных реакций

Section 2
Experimental and theoretical studies
of nuclear reactions

Theoretical calculation of the angular anisotropy of gamma radiation on carbon, chromium and iron nuclei in inelastic neutron scattering

A. V. Andreev^{1,2*}, N. A. Fedorov¹, T. Yu. Tretyakova^{1,2,3}, Yu. N. Kopatch¹,
P. G. Filonchik^{1,4}, A. L. Barabanov^{1,5,6}, P. S. Prusachenko¹, D. N. Grozdanov^{1,7},
K. O. Mataeva², P. I. Kharlamov^{1,3}, C. Hramco¹ (and TANGRA collaboration)

¹ Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

⁵ National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

⁶ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

⁷ Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Sofia, Bulgaria

*e-mail: andreev.av20@physics.msu.ru

Within the TANGRA international collaboration [1] at the Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP, JINR), systematic study of fast neutron reactions is being conducted. One of the most significant processes accompanying neutron–nucleus interactions is inelastic scattering, where the target nucleus is left in an excited state and when de-excites by emitting discrete gamma-ray lines. The study of the intensity and angular anisotropy of these gamma rays provides information about population mechanisms of the low-lying nuclear levels. The amount of accumulated experimental data on gamma-ray angular anisotropy and emission cross sections from inelastic neutron scattering ($n, n'\gamma$) enables a comprehensive study of this reaction.

This work focuses on the theoretical description of gamma-ray emission cross sections and angular anisotropy in the ($n, n'\gamma$) reaction. The angular distributions of gamma rays from inelastic scattering were derived using the theory of angular correlations and nuclear reaction theory [2, 3]. Our approach uses the S-matrix formalism for describing inelastic neutron scattering [4]. The influence of cascade feeding on both the cross sections and the angular anisotropy parameters of gamma radiation from neutron-excited nuclei is discussed.

The main goal of this research is to provide a theoretical description of cross sections and angular distributions of neutrons and gamma rays from inelastic scattering of fast neutrons on the nuclei: ^{12}C , ^{52}Cr , and ^{56}Fe .

Список источников

1. I. Ruskov, Y. Kopatch, V. Bystritsky [et. al.], EPJ Web Conf. **146**, 03024 (2017).
2. E. Sheldon, D. M. Van Patter, Rev. Mod. Phys. **38**(1) 143 (1966).
3. F. Rybicki, T. Tamura, G. R. Satchler, Nucl. Phys. A **146**, 659 (1970).
4. J. M. Blatt, L. C. Biedenharn, Phys Rev. **82**(1) 123 (1951).

Potential description of $\alpha+^{197}\text{Au}$ elastic scattering

Sajia Iffat¹, Nishat Tasnim¹, Shuva Saha^{1,2}, M. Nure Alam Abdullah^{1*}

¹Department of Physics, Jagannath University, Dhaka, Bangladesh

²Department of Basic Sciences and Humanities, University of Asia Pacific, Dhaka, Bangladesh

*e-mail: abdullah@phy.jnu.ac.bd

The experimental data for the elastic scattering cross section (CS) of α -particles incident on ^{197}Au are analyzed in terms of non-monotonic (NM) and single-folded (SF) types of optical potential (OP). The NM potential is a shallow potential, which has its roots in the nuclear energy-density functional formalism (NEDF) of Brueckner, Coon and Dabrowski (BCD) [1], and features a soft repulsive core in addition to its normal attractive part. The SF potential, on the other hand, is derived from the single-folding model of Abdullah et al. [2]. The folded potential, in this model, is constructed by folding the α - α and α -N interactions through their density distributions. The parameters of OP are obtained by analyzing the experimental angular distributions of $\alpha+^{197}\text{Au}$ elastic scattering at eight energy points from 20 to 48.2 MeV. Volume and surface types of empirically adjusted imaginary potentials, in appropriate proportions, are used, along with the real potential, to reproduce the experimental data. Both the NM and SF potentials have been found to satisfactorily account for the data. In a time-averaged picture, the number of nucleons, making α -like cluster, has been found to be $4A_\alpha = 180$ and the number of unclustered nucleons as $A_N = 17$, which gives $A_T = 197$. The rms radius of ^{197}Au has also been deduced.

This research has been funded by the Research Cell, Jagannath University, Dhaka-1100, Bangladesh (Grant No. JnU/D(R)O/38/2025/911).

References

1. K. A. Brueckner [et al.], Phys. Rev. **168**, 1184 (1968).
2. M. N. A. Abdullah [et al.], Eur. Phys. J. A **18**, 65 (2003).

Исследование протон-индуцированных реакций на висмуте-209

С. Р. Адоньев*, М. В. Желтоножская, А. П. Черняев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: stepan1018@mail.ru

В настоящее время наночастицы тяжёлых металлов с высоким атомным номером активно исследуются в качестве радиосенсибилизаторов для протонной терапии [1]. Висмут ($Z=83$) демонстрирует аномально высокий коэффициент сенсибилизации, однако физические механизмы этого явления остаются недостаточно изученными. В данной работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование сечений протон-индуцированных реакций на ядрах ^{209}Bi при энергиях протонов 40, 50 и 100 МэВ. Эксперимент выполнен на синхротронном комплексе протонной терапии «Прометеус» ФТИЦ ФИАН. Для теоретического описания использовались модель внутриядерного каскада INCL++ в связке с моделью дезэкситации ABLA07 [2], а также статистическая испарительная модель в рамках Talys 1,96 [3].

Получены экспериментальные сечения образования следующих радионуклидов: $\sigma(^{207}\text{Po})=55\pm 5$ мбн, $\sigma(^{206}\text{Po})=52\pm 12$ мбн, $\sigma(^{205}\text{Po})=92\pm 14$ мбн, $\sigma(^{204}\text{Po})=95\pm 11$ мбн при энергии протонов 100 МэВ; $\sigma(^{206}\text{Po})=524\pm 46$ мбн, $\sigma(^{205}\text{Bi})=986\pm 36$ мбн при энергии 50 МэВ; $\sigma(^{206}\text{Po})=987\pm 71$ мбн при энергии 40 МэВ. Показано, что при энергии 40 и 50 МэВ экспериментальные данные удовлетворительно описываются статистической моделью, тогда как при 100 МэВ модель внутриядерного каскада INCL++ воспроизводит сечения с лучшей точностью, что свидетельствует о переходе к каскадному механизму реакции.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 26-25-20158.

Список источников

1. Z. Kuncic, S. Lacombe, Phys. Med. Biol. **63**(2), 02TR01 (2018).
2. A. Kelic, M. V. Ricciardi, K.-H. Schmidt, arXiv:0906.4173 (2009).
3. A. J. Koning, M. C. Duijvestijn, S. Hilaire, AIP Conf. Proc. **769**, 1154 (2005).

Измерение угловых распределений распада ${}^7\text{He}$, заселяемого в реакции ${}^6\text{He}(d, p)$

А. А. Безбах^{1*}, М. С. Головков¹, А. В. Горшков¹, А. Г. Князев¹, С. А. Крупко¹, Ф. Лонг^{1,2},
Р. Мадонсела¹, А. Май^{1,2}, А. Макинде¹, Р. Турар^{1,3}, Х. Чжу^{1,4}

¹ Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт ядерных исследований, Далат, Вьетнам

³ Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Астана, Казахстан

⁴ Пекинский университет, Пекин, Китай

*e-mail: bezbakh@jinr.ru

Будут представлены предварительные результаты эксперимента по исследованию структуры ядра ${}^7\text{He}$, заселяемого в реакции ${}^6\text{He}(d, p)$ в инверсной кинематике на вторичном пучке ${}^6\text{He}$ с энергией 35 МэВ/нуклон, полученном на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ (г. Дубна). Интерес к данному ядру обусловлен результатами недавних исследований [1], [2], в которых при регистрации нейтронов из распадов ${}^7\text{He} \rightarrow {}^6\text{He} + n$ и ${}^7\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 3n$ с использованием массива нейтронных детекторов была получена новая информация об основном состоянии ${}^7\text{He}$, а также обнаружена асимметрия вперёд–назад в угловом распределении заряженных продуктов распада.

В 2025 году был выполнен пилотный эксперимент, направленный на измерение угловых распределений продуктов распада ${}^7\text{He}$; его результаты опубликованы в работе [3]. В новом эксперименте продукты распада регистрировались телескопом, расположенным в области передних углов на расстоянии 15 см за мишенью и состоящим из набора позиционно-чувствительных кремниевых детекторов. Проведенный анализ позволил однозначно идентифицировать изотопы и разделить каналы распада ${}^7\text{He}$ в основное и первое возбужденное состояние ($J\pi = 2^+$) ядра ${}^6\text{He}$. Угловые распределения восстанавливались по измеренным энергиям и углам вылета заряженных продуктов распада.

Впервые измерены угловые распределения для распада ${}^7\text{He} \rightarrow {}^6\text{He}(g. s.) + n$ в широком диапазоне энергий возбуждения ядра ${}^7\text{He}$ (до 8 МэВ в системе центра масс) относительно направления импульса, переданного в реакции ${}^6\text{He}(d, p)$. Эксперимент был выполнен в мае 2026 года на установке АКУЛИНА-2. В настоящее время проводится модельный анализ полученных данных. В докладе будут представлены предварительные результаты эксперимента и обсуждены их возможные последствия для понимания структуры и механизмов распада ядра ${}^7\text{He}$.

Список источников

1. А. А. Bezbakh [et al.], Int. J. Mod. Phys. E **33**, 245002 (2024).
2. M.S. Golovkov [et al.], Phys. Rev. C **109**, L061602 (2024).
3. A.A. Bezbakh [et al.], Int. J. Mod. Phys. E, 2641029 (2026).

Описание дифференциальных сечений упругого рассеяния изотопов водорода в теории прямых ядерных реакций

А. А. Галюзов*, М. В. Косов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

*e-mail: AAGaluzov@vniia.ru

Обычно считается, что при малых энергиях из-за кулоновского барьера вклад сильного взаимодействия в дифференциальное сечение упругого рассеяния изотопов водорода пренебрежимо мал. Однако оказалось, что даже при энергии 100 кэВ интерференция электромагнитных и сильных амплитуд упругого рассеяния изотопов водорода существенна. Расчёт сечения с учетом интерференции сильных и электромагнитных амплитуд производился в рамках модели прямых ядерных реакций. Энергетическая зависимость амплитуд и фаз рассеяния s -, t - и u -каналов описывалась с помощью эмпирических функций для вершинных частей диаграмм рассеяния с использованием экспериментальных значений сечений из базы данных EXFOR. При этом описывалась не только энергетическая зависимость полного сечения упругого рассеяния и угловое распределение рассеянных ионов водорода, но и деструктивная интерференция электромагнитной и ядерной амплитуд рассеяния, которую невозможно учесть при независимом моделировании сильных и электромагнитных процессов рассеяния.

Полученная энергетическая зависимость полных и дифференциальных сечений упругого рассеяния изотопов водорода может быть использована в астрофизических расчётах, при моделировании нейтронных генераторов, а также при расчёте термоядерных установок.

Neutron yield uncertainty calculations for (α, n) reactions using the NeuCBOT program

I. A. Goncharenko^{1*}, S. Westerdale², M. B. Gromov^{1,3}

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Research, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²University of California, Riverside, USA

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: iv.gonch.0907@gmail.ru

(α, n) reactions are an important source of neutron background in ultra-low-background detectors for dark matter and neutrino experiments. Precise neutron yield calculations are essential, but existing estimates of neutron yields and spectra from (α, n) reactions on light nuclei differ by tens of percent, so reliable uncertainty evaluations remain lacking. Existing uncertainties estimates are usually based on the spread between calculations rather than on physics input data uncertainties.

In this work, neutron yields and their uncertainties were calculated for a list of light nuclides using an upgraded NeuCBOT code with EXFOR experimental data. The uncertainties were derived directly from experimental cross-section errors, providing physically grounded uncertainty assessment. The preliminary results of calculated yield uncertainties for ^9Be , ^{13}C and ^{19}F are below 10%.

References

1. S. Westerdale, P. Meyers. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **875**, 57 (2017).
2. M. B. Gromov [et. al.], Phys. Atom. Nucl. **86**, 181 (2023).

Measurements of the gamma-ray emission cross sections and angular distributions from (n, γ) reactions with 14.1 MeV neutrons

D. N. Grozdanov^{1,2,*}, N. A. Fedorov¹, P. S. Prusachenko¹, Yu. N. Kopatch¹, V. R. Skoy¹,
I. N. Ruskov^{1,2}, T. Yu. Tretyakova^{1,3,4}, P. I. Kharlamov^{1,3,4}, A. V. Andreev^{1,4},
C. Hramco¹, P. G. Filonchik^{1,5} (and TANGRA collaboration)

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

³Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

*e-mail: dimitar@nf.jinr.ru

The study of inelastic scattering of fast neutrons by atomic nuclei is of great importance for both fundamental and applied neutron-nuclear physics. Reactions induced by neutrons provide a unique source of information for describing the processes of strong interaction between nucleons.

Inelastic scattering processes are utilized to study the characteristics of excited states of target nuclei [1]. The practical application of the (n,n' γ) reaction necessitates the expansion and refinement of experimental data on this process. Research on the inelastic scattering of fast neutrons has recently become more active, driven by new prospects for nuclear energy production using fast neutron reactors.

The purpose of this experiment was to refine the available data on emission cross sections and angular distributions from the inelastic scattering of 14.1 MeV neutrons by certain light nuclei. This work was conducted within the framework of the international TANGRA (TAGged Neutrons and Gamma RAYs) project at the Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, Russia.

Inelastic scattering was studied using the Tagged Neutron Method [2], in which neutrons with an energy of 14.1 MeV, produced in the d(t, α)n reaction, are “tagged” by detecting alpha particles. Gamma quanta from the (n,n' γ) reaction were recorded using a new multidetector system [3]. The experimental data are presented and discussed in comparison with previously published results.

This work was conducted with financial support from the Russian Science Foundation (grant № 23-12-00239)

References

1. W. Hauser, H. Feshbach. Phys. Rev., **87**, 366 (1952).
2. I. N. Ruskov, Yu. N. Kopatch, V. M. Bystritsky [et al.], Physics Procedia, **64**, 163 (2015).
3. Yu. N. Kopatch, D. N. Grozdanov, N. A. Fedorov [et al.], Mosc. Univ. Phys. Bull. **79**(3), 308 (2024).

Мультикластерная реализация задачи трёх тел на примере ядерных реакций с лёгкими ядрами

М. В. Егоров*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*e-mail: egorovphys@mail.ru

Поиск и уточнение сечений ядерных реакций для лёгких ядер является ключевым этапом верификации механизмов, лежащих в основе синтеза и перестройки сталкивающихся ядер, учитывающих внутреннюю структуру ядер, число участвующих во взаимодействии частиц и число открытых каналов. На сегодняшний день микроскопическое описание сечений ядерных реакций с лёгкими ядрами во многом опирается на CDCC-подходы, а также метод резонирующих групп, которые могут оперировать как кластерным [1] представлением ядер, так и используют микроскопические NN модели взаимодействия [2] для нахождения волновых функций ядер. В данной работе реализовано применение методов малочастичной динамики с опорой на интегральные уравнения Фаддеева в импульсном пространстве [3] для нахождения полных сечений реакций между лёгкими ядрами водорода, гелия, лития и бериллия. Разработанный подход опирается на кластерное рассмотрение ядер, волновая функция которых находится из решения как однородных уравнений Липпмана-Швингера для двух взаимодействующих кластеров, так и однородных уравнений Фаддеева для трёх взаимодействующих кластеров. Отдельное внимание уделено эквивалентному рассмотрению упругого рассеяния, реакций перестройки, синтеза лёгких ядер [4] и реакций развала с вылетом нескольких частиц в непрерывном спектре энергий. Получены сечения процессов ${}^3\text{He}(\text{T},\text{D}){}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}(\text{T},\text{np}){}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2\text{p}){}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}({}^3\text{He},{}^4\text{He}){}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}({}^3\text{He},\text{D}{}^4\text{He}){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(\text{n},\text{nD}){}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}(\text{n},\text{nT}){}^4\text{He}$, и ${}^9\text{Be}(\text{n},2\text{n})2{}^4\text{He}$, и проведено сравнение с доступными экспериментальными данными. Показано, что во многих рассмотренных процессах кластерное представление сталкивающихся ядер позволяет воспроизвести большую часть полного сечения. Проведены оценки процессов образования короткоживущих ядер ${}^5\text{He}$ в процессах вида ${}^6\text{Li}(\text{n},{}^5\text{He})\text{D}$ и ${}^7\text{Li}(\text{n},{}^5\text{He})\text{T}$ и ядра ${}^8\text{Be}$ в околопороговой области в процессе ${}^9\text{Be}(\text{n},2\text{n}){}^8\text{Be}$ и в радиационных захватах вида ${}^9\text{Be}(\gamma,\text{n}){}^8\text{Be}$.

Список источников

1. Y. A. Lashko, V. S. Vasilevsky, V. I. Zhaba, Phys. Rev. C **109**, 045803 (2024).
2. P. Navrátil, S. Quaglioni, R. Roth, W. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. Suppl. **195**, 117 (2012)
3. M. V. Egorov, Few-Body Syst. **66**, 24 (2025).
4. M. V. Egorov, arXiv:2604.22537 [nucl-th] (2026).

Особенности фоторасщепления изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$

В. В. Варламов, А. И. Давыдов*, В. Н. Орлин

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

Московского государственного университета, Москва, Россия

*e-mail: alexdavydovmet@gmail.com

Впервые определены новые неизвестные ранее сечения парциальных фотонейтронных реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на ядрах $^{185,187}\text{Re}$. Для их получения были использованы естественные соотношения между сечениями выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$ и полной фотонейтронной реакции $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$, опубликованными по результатам единственного эксперимента на пучке фотонов тормозного γ -излучения [1]. Установлено, что полученные таким методом экспериментальные сечения парциальных реакций для обоих изотопов рения не соответствуют объективным физическим критериям достоверности. С использованием экспериментально-теоретического метода [2] выполнена оценка сечений реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, соответствующих физическим критериям [3]. Обнаружены разнонаправленные для изотопов ^{185}Re и ^{187}Re расхождения между экспериментальными и оцененными сечениями реакций: в случае ^{185}Re $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 1n) > \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$ и $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 2n) < \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$, в случае ^{187}Re – обратные соотношения. С помощью оцененных сечений реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ для обоих изотопов рения получены новые достоверные сечения полной фотонейтронной реакции $\sigma(\gamma, sn)$. Установлено, что соотношения между интегральными оцененными сечениями этой реакции для изотопов $^{185,187}\text{Re}$ согласуются с оценкой дипольного правила сумм ($60NZ/A$), тогда как соотношения между экспериментальными данными [1] ей не соответствуют. Выполнен анализ причин разнонаправленных расхождений между экспериментальными и оцененными сечениями реакций. Показано, что непрямой метод [1] получения экспериментального сечения $\sigma(\gamma, sn)$ с помощью внесения в сечение $\sigma(\gamma, xn)$ поправок, рассчитанных по статистической теории [4], в случаях обсуждаемых изотопов рения является не вполне корректным. На процессы фоторасщепления ядер $^{185,187}\text{Re}$ заметное влияние оказывают нестатистические эффекты их деформации и соотношения энергетических порогов фотонейтронных и фотопротонных реакций. Оба ядра являются заметно и в разной степени деформированными, что делает применение единой формулы статистической теории для описания процессов их фоторасщепления не вполне оправданным. Дополнительными обстоятельствами, осложняющими применение чисто статистического подхода, являются не традиционные для относительно тяжелых ядер соотношения между энергетическими порогами фотонейтронных и фотопротонных реакций. Так, например, для обоих изотопов $^{185,187}\text{Re}$ пороги реакций $(\gamma, 1p)$ меньше порогов реакций $(\gamma, 1n)$, а пороги реакций $(\gamma, 1n1p)$ меньше порогов реакций $(\gamma, 2n)$. Такие нестатистические эффекты учитываются в Комбинированной модели фотоядерных реакций [5], что делает достоверными оцененные с ее использованием новые сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, sn)$.

Список источников

1. А. М. Горячев, Г. Н. Залесный, С. Ф. Семенко, Б. А. Тулупов, ЯФ **17**, 463 (1973).
2. В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, В. А. Четверткова, Изв. РАН. Сер. физ. **74**, 875 (2010).
3. В. В. Варламов, А. И. Давыдов, В. Н. Орлин, ЯФ, в печати.
4. J. M. Blatt, V. F. Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1952.
5. Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, ЯФ. **71**, 517 (2008).

Анализ рассеяния дейтронов на ядре ^{13}C в области энергий 13–18 МэВ: структура возбуждённых состояний и нейтронное гало

Н. Буртебаев¹, А. С. Демьянова², С. А. Гончаров³, Маулен Насурлла^{1,4}, А. Н. Данилов^{2*},
Маржан Насурлла¹, Р. А. Ходжаев^{1,4}, Д. А. Исаев^{1,4}, С. В. Дмитриев², К. О. Мурашов³,
Т. И. Леонова², С. А. Турганова^{1,4}

¹Институт ядерной физики Агентства республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: danilov1987@mail.ru

^{13}C является хорошим примером «нормального» ядра, хорошо описываемого в рамках оболочечной модели. Некоторые альфа-кластерные состояния появляются при более высоких энергиях возбуждения в области соответствующих порогов. Таким образом, схема уровней ^{13}C надежно определяется до энергий возбуждения ~ 10 МэВ и подробно описана в [1]. Однако некоторые новые идеи и результаты возродили интерес к ^{13}C .

Для исследования возбужденных состояний ^{13}C было проведено уточнение новых экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию дейтронов на ядре ^{13}C при энергии 14.5 и 18 МэВ, измеренных на циклотроне У-150М в ИЯФ (Алматы, Казахстан). Исследованы дифференциальные сечения переходов в состояния $1/2^+$ (3.098 МэВ), $3/2^-$ (3.684 МэВ) и $5/2^+$ (6.860 МэВ). Выполнен совместный анализ этих данных со всеми ранее полученными экспериментальными данными по дифференциальным сечениям упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ^{13}C в области энергий 13–18 МэВ. Анализ проведен в рамках метода искажённых волн (МИВ) с использованием различных моделей неупругого формфактора для описания конкретного возбуждения. Применялись модель деформированного оптического потенциала, микроскопическая модель одночастичного возбуждения и феноменологический подход с использованием комбинации производных формы Вудса–Саксона.

Радиальная зависимость формфактора для состояния $1/2^+$, 3.098 МэВ имеет значительную пространственную протяжённость, что указывает на наличие нейтронного гало в этом возбуждённом состоянии. Состояние $5/2^+$, 6.860 МэВ демонстрирует сходное радиальное поведение, что позволяет интерпретировать его как второе состояние ротационной полосы, построенной на гало-состоянии $1/2^+$. В то же время состояние $3/2^-$, 3.684 МэВ, традиционно рассматриваемое как ротационное возбуждение основного состояния, требует для описания данных при больших углах более сложного формфактора, что может указывать на примесь близлежащего уровня 3.853 МэВ. Полученные результаты вносят вклад в систематику одно-частичных и коллективных мод в лёгких ядрах и демонстрируют эффективность комбинированного феноменологического подхода к формфакторам неупругих переходов.

Список источников

1. W. von Oertzen, M. Freer, Y. Kanada-En'yo, Phys. Rep. **432**, 43 (2006).

Анализ реакции срыва $^{13}\text{C}(\text{d},\text{t})^{12}\text{C}$ в области энергий 13–18 МэВ: определение асимптотических нормировочных коэффициентов и структуры состояний ядра ^{12}C

Н. Буртебаев¹, А. С. Демьянова^{2*}, С. А. Гончаров³, Маулен Насурлла^{1,4}, А. Н. Данилов²,
Маржан Насурлла¹, Р. А. Ходжаев^{1,4}, Д. А. Исаев^{1,4}, С. В. Дмитриев², К. О. Мурашов³,
Т. И. Леонова², С. А. Турганова^{1,4}

¹Институт ядерной физики Агентства республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: a.s.demyanova@bk.ru

Представлены результаты анализа дифференциальных сечений реакции однонуклонного срыва $^{13}\text{C}(\text{d},\text{t})^{12}\text{C}$, измеренных на циклотроне У-150М в ИЯФ (Алматы, Казахстан) при энергиях дейтронов 14.5 и 18 МэВ, а также ранее опубликованных данных при 13.6 [1] и 18 МэВ [2]. Исследованы переходы в основное состояние (0^+) ядра ^{12}C и в возбуждённые состояния 2^+ (4.44 МэВ), 0^+ (7.65 МэВ) и 3^- (9.64 МэВ). Анализ выполнен в рамках приближения искажённых волн с конечным радиусом взаимодействия (FRDWBA) с использованием феноменологического метода определения радиальных формфакторов реакции, представленного ранее в [3].

Подобраны оптические потенциалы для входного ($\text{d}+^{13}\text{C}$) и выходного ($\text{t}+^{12}\text{C}$) каналов, учитывающие пороговую аномалию и обеспечивающие хорошее описание данных по упругому рассеянию. Для каждого перехода восстановлены формфакторы системы $^{12}\text{C} + \text{n}$, рассчитаны асимптотические нормировочные коэффициенты (АНК) и ядерные вершинные константы (ЯВК). Для основного и первого возбуждённого состояний ^{12}C полученные значения ЯВК согласуются с известными эмпирическими и теоретическими оценками [4], [5], [6]. Для состояний 0^+ (7.65 МэВ) и 3^- (9.64 МэВ) ЯВК определены впервые.

Сравнение радиальных зависимостей формфакторов показывает заметные отличия между состояниями, что отражает различия в структуре их волновых функций. Полученные эмпирические формфакторы могут служить критерием для проверки микроскопических моделей ядра ^{12}C , включая кластерные конфигурации и оболочечные эффекты. Работа демонстрирует надёжность феноменологического подхода к извлечению структурной информации из реакций однонуклонной передачи при средних энергиях.

Список источников

1. N. I. Zaika [et al.], Bull. RAS – Physics. **37**(5) 140 (1974).
2. S. A. Goncharov [et al.], Czech. J. of Physics. B **38**, 12 (1988).
3. N. Burtebayev [et al.], Phys. Part. Nuclei. **56**(5) 1240 (2025).
4. N. K. Timofeyuk, Physical Review. C **81**, 064306 (2010).
5. А.М. Мухамеджанов [и др.], ЯФ. **52**, 704 (1990).
6. С. М. Бекбаев [и др.], ЯФ. **54**, 387 (1991).

Измерение выхода фотоядерной реакции (γ , $p5n$) на ядре висмута

М. А. Демичев

Лаборатория ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия
e-mail: mdemichev@jinr.ru

Облучение образцов висмута с чистотой 99,9% проводилось на ускорителе ЛИНАК в ЛЯП ОИЯИ, в 2022 году, на выводе пучка до 200 МэВ. Результаты измерений в каналах с множественным выходом нейтронов ранее были доложены на конференции ЯДРО-2025 [1].

Выход реакции с протоном и пятью нейтронами, нормированный на выход с шестью нейтронами, был измерен при трех значениях энергии электронного ускорителя в диапазоне 55–70 МэВ, отвечающих правому краю спектра тормозного излучения. Измерения проводились методом активационного анализа с учетом сложной временной зависимости, возникающей при распаде родительского изотопа Bi-203 и дочернего изотопа Pb-203. Для корректных измерений потребовалось ввести поправки на изменение разрешения и доли мертвого времени спектрометра в процессе уменьшения полной активности измеряемого образца.

Полученные результаты сравниваются с уже имеющимися, но различающимися на несколько порядков, экспериментальными данными в этом канале и этой области энергий [2], [3]. Также результаты сравниваются с расчетами сечений в программе TALYS [4] с использованием разных ядерных моделей для плотности уровней энергии. Для расчёта выходов, сечения TALYS свертываются со спектрами тормозного излучения, рассчитанными по упрощенной модели установки в пакете GEANT4 [5]. Из результатов расчёта можно сделать вывод о том, что сечение в протонном канале гораздо сильнее зависит от выбора модели чем в чисто нейтронном.

Список источников

1. M. Demichev [et al.], Book of Abstracts of the NUCLEUS-2025, 273.
2. S. S. Belyshev [et al.], Eur. Phys. J. A **51**, 67 (2015).
3. M. Krmar [et al.], Eur. Phys. J. A **59**, 170 (2023).
4. A. Konig, S. Hilaire, S. Goriely Eur. Phys. J. A **59**, 131 (2023).
5. J. Allison [et al.], Nucl. Instrum. Meth. A **835**, 186 (2016).

Excitation and decay of the Gamow-Teller resonance and its satellites in compound nuclei

I. N. Izosimov

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: izosimov@jinr.ru

The Isobar-Analog Resonance (IAR) can be successfully excited in direct charge-exchange nuclear reactions, in compound nucleus reactions, and in β -decay. The Gamow-Teller Resonance (GTR) and its satellites can manifest themselves both in the β -decay of atomic nuclei and in direct charge-exchange nuclear reactions [1]. The excitation and decay of the IAR, GTR, and their satellites cannot be described by statistical theory [1], [2], [3]. The so-called intermediate structure is clearly manifested in the envelope of the fine structure of these resonances [2], [3]. Deviations from the statistical theory have been observed in (p,γ) reactions. For (p,γ) reactions, the observed non-statistical effects can be connected with the neutron excess in $N>Z$ nuclei and the excitation of GTR satellites in compound nuclei [3].

This report analyzes non-statistical effects manifested in nuclear reactions involving heavy ions and low-energy protons beams are analyzed. The association of non-statistical effects in nuclear reactions with the excitation of GTR, its satellites and spin–isospin $SU(4)$ symmetry is discussed.

References

1. Yu. V. Naumov, A. A. Bykov, I. N. Izosimov, Sov. J. Part. Nucl., **14**(2), 175 (1983).
2. I. N. Izosimov, EPJ Web of Conferences, **239**, 02003 (2020).
3. I. N. Izosimov, JINR Preprint E6-2024-14. Dubna, 2024.

Status of research on fissioning isomers in the fragments of binary fission of heavy nuclei

D. V. Kamanin¹, Yu. V. Pyatkov^{2,1}, A. N. Solodov¹, V. E. Zhuchko¹, Z. I. Goryainova¹, O. V. Strekalovsky^{3,1},
E. A. Kuznetsova¹, A. O. Zhukova¹, Yu. M. Sereda¹, T. H. Vilane^{1,3}, P. Z. Ngcobo⁴, B. A. Le¹

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² National Nuclear Research University «MEPHI», Moscow, Russia

³ University of South Africa, Pretoria, Republic of South Africa

⁴ University of Zululand, Empangeni, Republic of South Africa

e-mail: kamanin@jinr.ru

The report is dedicated to summarizing the experimental activities of the FOBOS group in FLNR (JINR) on studying of the fissioning isomers in fission fragments [1], [2]. The results of a series of experiments performed in the frame of different experimental approaches indicate the presence of long-lived fissioning isomers in the fragments of binary fission of low excited heavy nuclei. In this context, inelastic scattering of such fragments in solid foils acts as a specific detector of these states. As a result of the scattering, a fragment undergoes binary break-up. The discussed results are completely novel: induced fission of a cold medium-heavy nucleus from a shape isomer state has never been observed experimentally before, and there are no theoretical predictions for the observed effect.

References

1. Yu. V. Pyatkov [et al.], Proc. 27th Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-27), Dubna, Russia, 2019.
2. D. V. Kamanin [et al.], Phys. Part. Nucl. Lett. **22**, 272 (2025).

$^{237}\text{Np}+^{48}\text{Ca}$ reaction and decay properties of ^{282}Nh and descendant nuclei at DGFRS-2

E. C. Karanfil^{1*}, Yu. Ts. Oganessian¹, V. K. Utyonkov¹, D. I. Solov'yev¹, F. Sh. Abdullin¹, G. G. Adamian¹,
D. Ibadullayev^{1,2}, M. G. Itkis¹, N. D. Kovrizhnykh¹, D. A. Kuznetsov¹, O. V. Petrushkin¹,
A. V. Podshibiakin¹, A. N. Polyakov¹, A. G. Popeko¹, I. S. Rogov¹, R. N. Sagaidak¹, L. Schlattauer^{1,3},
V. D. Shubin¹, M. V. Shumeiko¹, Yu. S. Tsyganov¹, A. A. Voinov¹, A. V. Sabelnikov¹, D. Abdusamadzoda¹,
A. Yu. Bodrov¹, M. G. Voronyuk¹, G. A. Bozhikov¹, N. V. Aksenov¹, A. V. Khalkin¹, Z. G. Gan⁴,
Z. Y. Zhang⁴, M. H. Huang⁴, H. B. Yang⁴, J. G. Wang⁴, M. M. Zhang^{1,4}, X. Y. Huang^{1,4,5}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

³Palacky University Olomouc, Department of Experimental Physics, Olomouc, Czech Republic

⁴State Key Laboratory of Heavy Ion Science and Technology, Institute of Modern Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China

⁵School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

*e-mail: karanfil@jinr.ru

In this study, $^{237}\text{Np}+^{48}\text{Ca}$ reaction performed at the DGFRS-2 gas filled separator [1] at the Super Heavy Element Factory [2] at Flerov Laboratory of Nuclear Reactions will be presented. The significance of this reaction is that it can be used to measure the decay properties of the daughter products of the $^{243}\text{Am} + ^{54}\text{Cr}$ reaction, which can be used for the synthesis of the element 119. During the experiment, three alpha decay chains of ^{282}Nh are observed. These chains consist of the descendant nuclei ^{278}Rg , ^{274}Mt , ^{270}Bh , and terminate with the spontaneous fission of ^{266}Db . While the half-lives of ^{282}Nh , ^{278}Rg , and ^{270}Bh are found to be consistent with the experimental systematics for odd- Z nuclei. The half-life of the third isotope in the chain, ^{274}Mt , exceeds the systematic expectation by two orders of magnitude [3]. This significant deviation in half-life might indicate the presence of a long-lived isomeric state in ^{274}Mt . This increased half-life has been measured for the first time for the heaviest odd- Z nuclei with $Z \geq 107$. Reaction cross section is $0,43^{+0.46}_{-0.25}\text{pb}$ for the 3n channel. This value is consistent with the shape of the excitation functions of the 3n channel in ^{48}Ca -induced reactions [4]. The upper cross-section limit of the 4n reaction channel was 0,28 pb.

References

1. Yu. Ts. Oganessian [et al.], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1033**, 166640 (2022); D. I. Solov'yev and N. D. Kovrizhnykh, J. Instrum. **17**, P07033 (2022).
2. G. G. Gulbekian [et al.], Phys. Part. Nucl. Lett. **16**, 866 (2019).
3. F. G. Kondev, M. Wang, W. J. Huang, S. Naimi, G. Audi, Chin. Phys. C **45**, 030001 (2021).
4. Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, Rep. Prog. Phys. **78**, 036301 (2015); Nucl. Phys. A **944**, 62 (2015).

Фотоядерные реакции с вылетом протонов на изотопах эрбия

А. А. Ким*, М. В. Желтоножская, А. П. Черняев

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

Московского государственного университета, Москва, Россия

*e-mail: kim@srd.sinp.msu.ru

Выходы фотопротонных реакций (γ, p) из-за кулоновского подавления теоретически оцениваются как чрезвычайно малые, а объем накопленных экспериментальных данных значительно уступает информации о (γ, n)-каналах. Вместе с тем имеющиеся экспериментальные значения систематически превышают предсказания каскадно-испарительных моделей, что свидетельствует о существенном вкладе прямых и полупрямых механизмов, способных на порядки усилить выход фотопротонов по сравнению с испарительным механизмом составного ядра.

Практическую значимость такие реакции приобретают в контексте тераностики – нового направления ядерной медицины, где радиоизотопы редкоземельных элементов особенно привлекательны благодаря сходству химических свойств. Одним из таких изотопов является гольмий-166 ($T_{1/2} = 26.8$ ч), испускающий β^- -частицы с пробегом в мягких тканях порядка нескольких миллиметров для терапии и низкоэнергетическое γ -излучение (80,6 кэВ) для ОФЭКТ-визуализации, а также обладающий парамагнитными свойствами для МРТ. Однако существующие способы получения ^{166}Ho в реакции $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166}\text{Ho}$ или путем двойного нейтронного захвата на ^{164}Dy в реакции $^{164}\text{Dy}(n, \gamma)^{165}\text{Dy}(n, \gamma)^{166}\text{Dy}(n, \gamma) \rightarrow ^{166}\text{Ho}$ – либо дают «радионуклид с носителем», либо требуют высокопоточных реакторов.

Ввиду крайней малочисленности экспериментальных данных по (γ, p)-реакциям для редкоземельных ядер с $Z > 60$, новые измерения на естественном эрбии в широком диапазоне энергий тормозного излучения представляют собой актуальную задачу как для понимания механизмов фотопротонных реакций, так и для оценки возможности фотоядерного получения медицинского изотопа гольмия.

Была проведена серия облучений с использованием природных мишеней эрбия при граничных энергиях тормозного излучения 23 и 55 МэВ. Продолжительность облучения образцов в разных экспериментах составляла 15–40 мин. Для оценки потока тормозного излучения, использовалась хорошо изученная ядерная реакция $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ – вместе с мишенями эрбия располагались мишени металлического естественного тантала той же геометрии. Спектры гамма-лучей облученных мишеней измерялись на полупроводниковых спектрометрах, с детекторами из сверхчистого германия Canberra и Ortec с эффективностью регистрации (15–40) % по сравнению с NaI(Tl)-детектором размерами 3'×3". Энергетическое разрешение спектрометров составило 1,8–2,0 кэВ на γ -линиях 1173, 1332 кэВ ^{60}Co .

Полученные экспериментальные значения выходов изученных реакций, приводящих к образованию изотопов гольмия сравнивались с теоретическими расчетами, выполненными в рамках каскадно-испарительной модели ядра с использованием кода TALYS и с учетом полупрямых механизмов фотопротонных реакций. На основе адаптированной модели проведены теоретические расчеты средневзвешенных выходов реакций, приводящих к образованию радиоактивных и стабильных изотопов гольмия для граничных энергий тормозного излучения 25, 30, 35, 40, 45 и 55 МэВ и определен оптимальный диапазон энергий тормозного излучения для наработки ^{166}Ho – около 30 МэВ. Полученные результаты обсуждаются.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-22-20051).

***AB INITIO* description of scattering**

V. A. Kulikov^{1,2*}, W. Du³, M. A. Sharaf³, A. M. Shirokov¹, U. M. Yanikov^{1,2}

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China

*e-mail: kulikov@nucl-th.sinp.msu.ru

We consider the *ab initio* description of scattering processes within the No-core Shell Model (NCSM). This work provides an approach for calculating scattering observables utilizing either the Lanczos algorithm [1] initiated from the NCSM basis truncation boundary, or our adaptation [2] of the Efros formalism [3] which utilizes achievements of the HORSE method [4]. The efficacy of the proposed approach is demonstrated using nucleon–alpha (N– α) scattering as an example. The wave function asymptotics in the case of charged particle scattering are described using the method of Ref. [5].

References

1. A. M. Shirokov, A. I. Mazur, J. P. Vary, I. A. Mazur, J. Phys.: Conf. Series **403**, 12021 (2012).
2. M. A. Sharaf, A. M. Shirokov, W. Du, J. P. Vary, Phys. Rev. C **112**, 024617 (2025).
3. V. D. Efros, Phys. Rev. C **99**, 034620 (2019).
4. J. M. Bang, A. I. Mazur, A. M. Shirokov, Yu. F. Smirnov, S. A. Zaytsev, Ann. Phys. NY **280**, 299 (2000).
5. U. M. Yanikov, V. A. Kulikov, A. M. Shirokov, Int. J. Mod. Phys. E **35**, 2641015 (2026).

Моменты инерции bending-моды и их влияние на спины фрагментов деления

Д. Е. Любашевский*, Л. В. Титова, Д. А. Якунин, М. И. Рябцева

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: dima_physicist@mail.ru

В моделях двойной ядерной системы bending-колебания (противоположные вращения фрагментов вокруг линии, перпендикулярной оси деления) рассматриваются в качестве одного из основных механизмов генерации спинов осколков при делении. Однако в [1], [2], [3] используются различные определения эффективного момента инерции данной моды, представленные в таблице, что приводит к количественным расхождениям в предсказаниях величин спинов и их корреляций.

$J_b = \frac{J_L J_H}{J_L + J_H}, [1]$	$J_b = \frac{J_L J_R}{J_L + J_R}, [3]$	$J_b = \frac{J_H J_R}{J_H + J_R}, [4]$
--	--	--

В [1] при разложении полной вращательной энергии по нормальным модам момент инерции bending-колебаний принимает вид приведённого момента инерции двух фрагментов, где J_H и J_L – моменты инерции лёгкого и тяжёлого осколков. Это выражение вытекает из условия $\delta L=0$ (сохранение орбитального момента) и антипараллельности спинов фрагментов, представляет собой классический результат, впервые полученный в работе [2].

В работе [3] предложена иная форма момента инерции, включающая орбитальный момент инерции $J_R = \mu R^2$. В рамках этого подхода bending-мода трактуется как флуктуации относительно равновесного вращения, тогда как в [1] она рассматривается как чистая мода без учёта орбитального отклика. В модели [3] bending-колебание представляет собой вращение лёгкого фрагмента деления, которое компенсируется поворотом всего делящегося ядра, что приводит к появлению вклада в орбитальный момент. Аналогичный подход представлен в работе [4], однако, в отличие от [3], в [4] bending-колебание соответствует вращению тяжёлого фрагмента деления, которое компенсируется поворотом всей системы и также сопровождается возникновением вклада в орбитальный момент.

В работах [3], [4] момент инерции bending-моды является приведённым ($\lesssim 10^2 \hbar^2/\text{МэВ}$), однако само определение этих мод соответствует *pseudo-bending* -колебаниям, поскольку, в отличие от классического случая [2], сопровождается появлением орбитального момента. В условиях термодинамического равновесия средний квадрат спина, генерируемого bending-модой, пропорционален температуре $J_b T$, что при типичных температурах (порядка 1–2 МэВ) даёт вклад в спин осколков на уровне 2–6 $\hbar$.

В настоящей работе в рамках модели «холодного» деления проведены оценки спинов, орбитальных моментов и коэффициентов корреляции для вынужденного деления ^{238}U и ^{232}Th , а также спонтанного деления ^{252}Cf , выполнена верификация с данными [4] и продемонстрирована чувствительность к выбору модели момента инерции фрагментов (от гидродинамической до сверхтекучей).

Список источников

1. J. Randrup, R. Vogt, Phys. Rev. C. **89**, 044601 (2014).
2. J. R. Nix, W. J. Swiatecki, Nucl. Phys. **71**, 1 (1965).
3. J. Randrup, T. Dossing, R. Vogt, Phys. Rev. C. **106**, 14609 (2022).
4. T. M. Shneidman [et al.], Phys. Rev. C **65**, 064302 (2002).
5. J. N. Wilson [et al.], Nature **590**, 566 (2021).

Изучение механизмов выбивания нейтрона в реакции ${}^9\text{Be}({}^7\text{Be}, {}^6\text{Be})\text{X}$ при промежуточной энергии

Д. Е. Макаров^{1,3*}, Л. В. Григоренко^{1,2,3}, М. С. Хирк¹, П. Г. Шаров¹

¹Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова

Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*makarov-danila-2001@mail.ru

В данной работе исследуются механизмы заселения состояний ядра ${}^6\text{Be}$ в реакции выбивания ${}^9\text{Be}({}^7\text{Be}, {}^6\text{Be})\text{X}$ при энергии пучка 67 МэВ/нуклон в моделях увеличивающейся сложности. Анализируемые данные по этой реакции были получены на фабрике радиоактивных изотопов NSCL (MSU, USA) в 2011 г. При чём они являются рекордными по статистике и детализации в области исследования реакций с радиоактивными изотопами. Однако эти данные были рассмотрены только с точки зрения распада ${}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + \text{p}$, а в качестве модели реакции было взято простейшее «приближение внезапного срыва», где амплитуда перехода выражается через форм-фактор падающего пучка. Однако данная модель не является удовлетворительной, поскольку плохо описывает результаты эксперимента уже на качественном уровне.

Простейшая модель, учитывающая закон-сохранения энергии-импульса, а также позволяющая полуаналитическое рассмотрение, есть модель «квазисвободного рассеяния», описанная в формализме PWBA, в рамках которой рассматривается рассеяние нуклона на ядре-мишени как целом. Для сравнения с экспериментом понадобилось в рамках данной модели учесть также толщину мишени, неоднородность расположения детекторов и эффекты неупругости в канале ${}^9\text{Be} + \text{n}$. Однако в рамках данного приближения удалось описать только часть импульсного распределения.

Для полного описания экспериментальных данных была сформулирована модель рассеяния нейтрона на отдельных нуклонах мишени, рабочее название которой «симметричное квазисвободное рассеяние». И как было выяснено, данная модель совместно с формализмом PWBA вновь с учётом толщины мишени и геометрии массива детекторов описывает экспериментальные данные с хорошей точностью, причём как для низколежащих, так и высоковозбуждённых состояний. Помимо этого, полученные в том же эксперименте данные в двухчастичном канале распада ${}^6\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ также демонстрируют согласие с указанным приближением.

В докладе представлены результаты описания экспериментальных данных в рамках приближения внезапного срыва, формализма PWBA, а также модели «симметричного квазисвободного рассеяния» для низколежащих и высоковозбуждённых состояний в трёхчастичном канале ${}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + \text{p}$. Помимо этого, продемонстрированы результаты моделирования в модели «симметричного квазисвободного рассеяния» и формализме PWBA для двухчастичного канала распада ${}^6\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^3\text{He}$.

Список источников

1. L. V. Grigorenko [et al.], Phys. Lett. B **677**, 30 (2009).
2. I. A. Egorova [et al.], Phys. Rev. Lett. **109**, 202502 (2012).
3. L. V. Grigorenko [et al.], Phys. Rev. C **80**, 034602 (2009).

Modeling of isotopic scaling and target ratio in transport statistical approach

T. I. Mikhailova^{1*}, B. Erdemchimeg^{1,2}

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² National University of Mongolia, NRC, Ulaanbaatar, Mongolia

*e-mail: tmikh@jinr.ru

Peripheral collisions at Fermi energies provide the opportunity not only to obtain a huge amount of new isotopes, sometimes not existing in nature, but to get better understanding of mechanism of nuclear reactions and the essential quantities of nuclear matter, such as chemical potentials, density and intrinsic energy. In this report the calculations of isotopic scaling and target ratios for the reactions with $^{48/40}\text{Ca}$ and $^{64/56}\text{Ni}$ beams colliding with the ^{181}Ta and ^9Be targets at energy 140 Mev per nucleon fulfilled in modified transport-statistical approach in comparison with the experimental data are presented. The comparison with the empirical parametrization of fragmentation cross sections model, its modified version FRACS and Abrasion-Ablation model calculations is presented. The differences of the approaches are discussed and the importance of taking into account the impact parameter characteristic and the temperature dependence are highlighted.

Список источников

1. T. I. Mikhailova [et al.], Rom. Jour. Phys. **52**, 857 (2007).
2. T. I. Mikhailova, B. Erdemchimeg, Yu. M. Sereda, Bull. Russ. Acad. Sci. **89**, 1216 (2025).

Роль нейтронного избытка в механизмах передачи нуклонов в реакциях тяжелых ионов $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$

К. Д. Молоторенко^{1,2*}, А. Ажибеков¹, С. М. Лукьянов¹, В. А. Маслов¹

¹Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: molotorenkoksenia@gmail.com

В реакциях $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ при энергиях 392 и 400 МэВ исследованы энергетические и угловые распределения снарядоподобных продуктов [1]. Измерены энергетические спектры продуктов реакций с $|\Delta Z|=8$, угловые распределения и зарядовые распределения сечений реакций. Особое внимание уделено исследованию влияния нейтронного избытка ядра-снаряда на механизмы передачи нуклонов и диссипативные процессы в столкновениях тяжелых ионов [2].

Для анализа механизмов формирования продуктов реакций построены диаграммы Вильчинского [3] в системе центра масс и исследованы зависимости отношений скоростей продуктов к скоростям ядер-снарядов. Проведено сравнение с реакцией $^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$, что позволило проследить влияние массы и нейтронного состава налетающего ядра на характеристики энергетических спектров и угловых распределений продуктов реакции.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о сосуществовании квазиупругих и глубоконеупругих процессов передачи нуклонов. Сравнение с теоретическими расчетами, выполненными в рамках кода Grazing, показывает, что квазиупругие процессы передачи протонов удовлетворительно описываются данной моделью. Результаты работы позволяют получить дополнительную информацию о роли нейтронного избытка в механизмах многочастичных передач в реакциях тяжелых ионов.

Список источников

1. S. M. Lukyanov, A. K. Azhibekov, V. A. Maslov [et al.], Eur. Phys. J. A, submitted. (2026).
2. В. В. Волков. Ядерно-физические исследования в реакциях с тяжелыми ионами: Избранные работы. Дубна, ОИЯИ (2012).
3. J. Diklič, S. Szilner, L. Corradi [et al.], Phys. Rev. C **107**, 014619 (2023).

Исследование рассеяния ${}^6\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2

Д. Е. Макаров^{1,3}, И. А. Музалевский^{1*}, А. А. Безбах¹, С. Г. Белогуров¹, Р. Вольский¹,
М.С. Головков¹, А. В. Горшков¹, Л. В. Григоренко^{1,2,3}, Г. Каминский¹, А. Г. Князев¹,
С. А. Крупко¹, А. М. Куинь^{1,4}, Е. Ю. Никольский^{1,2}, Ю. Л. Парфенова¹, С.А. Рымжанова¹,
С. И. Сидорчук¹, Р. С. Слепнев¹, С. В. Степанцов¹, А. С. Фомичев¹, Б. Р. Хамидуллин¹,
М. С. Хирк¹, П. Г. Шаров¹

¹ Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова

Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

⁴ Институт ядерных исследований, Далат, Вьетнам

*e-mail: muzalevsky@jinr.ru

В работе представлены результаты эксперимента на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 ЛЯР ОИЯИ по изучению реакций упругого и неупругого рассеяния ${}^6\text{He} + {}^4\text{He}$ в широком угловом диапазоне. Вторичный пучок ${}^6\text{He}$ с энергией 151(168) МэВ облучал криогенную газовую мишень ${}^4\text{He}$ толщиной 5.5 мм при температуре 12 К и давлении 1(2) атм. Продукты реакции регистрировались в двухплечевой геометрии с использованием детекторной системы, описанной в работе [1].

Основной задачей исследований было определение дифференциальных сечений для каналов ${}^6\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^6\text{He}(\text{g.s.})$ и ${}^6\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^6\text{He}(2+)$. Для канала с образованием ${}^6\text{He}$ в основном состоянии было получено угловое распределение в системе центра масс (сцм) в более широком диапазоне углов и с лучшим разрешением, чем в ранних измерениях [2]. В частности, для $\Theta_{\text{сцм}} \sim 15\text{-}60$ градусов и особенно для диапазона $\Theta_{\text{сцм}} \sim 130\text{-}165$ градусов, относящегося к механизму реакции передачи двух нейтронов, были получены новые данные. Угловое распределение для канала с возбуждением состояния ${}^6\text{He}(2+)$ было выделено по событиям с одновременной регистрацией двух альфа-частиц и впервые получена зависимость сечения от угла в области 130-165 градусов. Для описания данных под передними углами использовалась оптическая модель, а для задних углов коды FRESCO и DWUCK5. Результаты эксперимента позволяют планировать дальнейшие исследования ядерных реакций во взаимодействиях ${}^6,8\text{He}$ ($E \sim 25\div 35$ АМэВ) + ${}^4\text{He}$.

Список источников

1. A. A. Bezbakh, S. G. Belogurov, V. Chudoba [et al.], Phys. Part. Nuclei Lett. **20**, 629 (2023).
2. G. M. Ter-Akopian, A. M. Rodin, A. S. Fomichev [et al.], Phys. Lett. B **426**, 251 (1998).

Experimental studies of $^{10}\text{B}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})^9\text{B}$ transfer reaction at 58 MeV

S. S. Stukalov¹, Yu. G. Sobolev¹, V. V. Samarin^{1,2}, M. A. Naumenko^{1*}, N. Burtebayev³, A. N. Danilov⁴,
A. S. Demyanova⁴, S. V. Dmitriev⁴, M. Nassurlla³, A. V. Shakhov¹

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² Dubna State University, Dubna, Russia

³ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Republic of Kazakhstan

⁴ National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia

*e-mail: anaumenko@jinr.ru

The angular distributions for the elastic scattering of ^7Li on ^{10}B and lithium-induced reaction of single neutron transfer $^{10}\text{B}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})^9\text{B}$ were measured at $E_{\text{lab}} = 58$ MeV. The experiment was performed earlier using the U-400 accelerator beam at FLNR JINR, Dubna [1], [2], [3]. The $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$ reaction products $^4,6\text{He}$, $^6,8\text{Li}$, $^7,9,10\text{Be}$, and $^{10,11,12}\text{B}$ were detected by a $\Delta E-E$ telescope. The theoretical analysis of the $^{10}\text{B}(^7\text{Li}, ^6\text{Li})^{11}\text{B}$ channel was carried out in [4] using the microscopic optical potential and the distorted-wave Born approximation. The reaction channel $^{10}\text{B}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})^9\text{B}$ studied in this work is of interest due to the short lifetime 8×10^{-19} s of the reaction product ^9B . It should be noted that the experimental quadrupole deformation parameters are $\beta_2 = -1$ for ^7Li and $\beta_2 = +0.52$ for ^{10}B [5]. In the initial approximation, we performed the DWBA analysis of the transfer to the ground state and to the excited state 1^+ (0.98 MeV) of ^8Li in the representation of ^7Li and ^{10}B as spherical nuclei. In addition, in a more realistic model, the deformations and the cluster structure [6], [7] of the colliding nuclei ^7Li and ^{10}B were taken into account in the shell model [8] and in the time-dependent description of neutron transfer channels [9], [10].

References

1. Yu. G. Sobolev, J. L. Ferreira, S. S. Stukalov [et al.], Phys. Rev. C **112**, 064601 (2025).
2. S. Stukalov, Yu. Sobolev, Yu. Penionzhkevich [et al.], Nguyen Hoai Chau, arXiv:2408.09231v2 [nucl-ex] (2024).
3. S. S. Stukalov, Yu. G. Sobolev, Yu. E. Penionzhkevich [et al.], Phys. At. Nucl. **87**(3), 426 (2024).
4. E. V. Zemlyanaya, K. V. Lukyanov, V. K. Lukyanov [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **89**, 1236 (2025).
5. Chart of nucleus shape and size parameters ($1 \leq Z \leq 15$). URL: <http://cdfc.sinp.msu.ru/cgi-bin/muh/radchartnucl.cgi?zmin=1&zmax=15&zch=0&fz=12&tdata=123456>.
6. V. V. Samarin, M.A. Naumenko, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **83**, 411 (2019).
7. V. V. Samarin, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **85**, 501 (2021).
8. V. V. Samarin, Phys. Part. Nucl. **57**, 217 (2026).
9. V. V. Samarin, Phys. At. Nucl. **78**, 128 (2015).
10. V. V. Samarin, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **84**, 990 (2020).

**Экспериментальный поиск аномалии при снятии возбуждения ядра $^8\text{Be}^*$
с испусканием электрон-позитронной пары в реакции взаимодействия нейтронов
с энергией свыше 20 МэВ с ядром ^{10}B**

С. И. Поташев*, А. И. Драчев, А. А. Каспаров, С. Х. Караевский, И. А. Мазур,
Е. А. Пермяков, В. Н. Пономарев, А. Н. Сахаров, В. И. Разин

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: potashev@inr.ru

На нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН был проведен эксперимент по исследованию дипольных переходов из возбужденного состояния ядра $^8\text{Be}^*$ в основное состояние при его образовании в реакции взаимодействия быстрых нейтронов с ядром ^{10}B с вылетом электрон-позитронной пары.

В данных реакции $n + ^{10}\text{B}$ с вылетом ядра ^3H и возбужденного ядра $^8\text{Be}^*$ в состояниях с энергиями 17,64 МэВ ($J^\pi = 1^+$; $T = 1$) и 18,15 МэВ ($J^\pi = 1^+$; $T = 0$) анализировались события совпадения с сигналами от электрона и позитрона. В зависимости коэффициента внутриядерной конверсии e^+e^- пары от угла разлета e^+ и e^- в диапазоне углов от 120° до 139° во взаимодействии нейтрона с энергией свыше 20 МэВ с ядром ^{10}B при угле около 136° была обнаружена аномалия. В окрестности угла 140° была обнаружена аналогичная аномалия АТОМКИ [1], одним из вероятных объяснений которой является существование не вписывающегося в Стандартную модель бозона X_{17} . Эксперимент выполнен на установке [2], включающей новый позиционно-чувствительный детектор-мишень ^{10}B и двухплечевой парный спектрометр e^+ и e^- , состоящий из двух позиционно-чувствительных кремниевых детекторов и двух сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов NaI.

Список источников

1. A. J. Krasznahorkay [et al.], Phys. Rev. Lett. **116**, 042501 (2016).
2. S. Kh. Karaevsky [et al.], Instr. Exp. Tech. **68**, 360 (2025).

Изоспиновое расщепление гигантского дипольного резонанса на средних и тяжелых ядрах

Ф. А. Расулова^{1,2}, А. А. Кузнецов^{3,4}, В. О. Нестеренко⁵, Ж. Х. Хушвактов^{2,5}, С. И. Алексеев¹,
Н. Ю. Фурсова^{3,4}, А. Ш. Мадумаров¹, И. Чупраков^{1,7}, С. С. Бельшев^{3,4}, Н. В. Аксенов¹

¹ Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт ядерной физики Академии наук, Ташкент, Республика Узбекистан

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики

Московского государственного университета, Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет, Москва, Россия

⁵ Лаборатория теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

⁶ Лаборатория ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

⁷ Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан,

*e-mail: rasulova@jinr.ru

В данной работе эксперименты проводились при энергиях конечной точки тормозного излучения 10-23 МэВ с пучком из микротрона МТ-25 ЛЯР ОИЯИ с использованием метода γ -активации. Энергии электронов находились в диапазоне 10-23 МэВ с шагом энергии 1 МэВ. Для получения γ -излучения использовалась мишень-радиатор из вольфрама. Наведенная активность в облученных мишенях из природной смеси Se [1], Mo [2], Cd [3], Te [3], Sm, Gd, Dy, Yb, Hf, и Pt [4] измерялась с использованием германиевого γ -детектора высокой чистоты, экспериментальные выходы реакций нормировались на выход реакций $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81}\text{Se}$, $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}$, $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}$, $^{154}\text{Sm}(\gamma, n)^{153}\text{Sm}$, $^{160}\text{Gd}(\gamma, n)^{159}\text{Gd}$, $^{158}\text{Dy}(\gamma, n)^{157}\text{Dy}$, $^{176}\text{Yb}(\gamma, n)^{175}\text{Yb}$, $^{176}\text{Hf}(\gamma, n)^{175}\text{Hf}$ и $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197}\text{Pt}$, соответственно. В результате экспериментов впервые получены экспериментальные значения относительных выходов реакций (γ, n) и (γ, p) , образующих ядра $^{73,75,81}\text{Se}$, $^{91,99}\text{Mo}$, $^{105,107,109,111m,115}\text{Cd}$, $^{119,121,123m,125m,127,129}\text{Te}$, $^{143,153}\text{Sm}$, $^{151,153,159}\text{Gd}$, $^{155,157}\text{Dy}$, $^{167,169,175}\text{Yb}$, $^{173,175,180m}\text{Hf}$, $^{189,191,193m,195m,197}\text{Pt}$ и $^{73,76,77,79}\text{As}$, $^{91m,95,96,97}\text{Nb}$, $^{105,111,112,113,115}\text{Ag}$, $^{122,124,127,129}\text{Sb}$, $^{143,148g,148m,149,151}\text{Pm}$, $^{156,157,159}\text{Eu}$, $^{160,161,162,163}\text{Tb}$, $^{172,173,175}\text{Tm}$, $^{176m,177,178,179}\text{Lu}$, $^{194,195}\text{Ir}$.

Экспериментальные значения относительных выходов сравнивались с теоретическими результатами, полученными на основе TALYS со стандартными параметрами [5] и комбинированной модели фотонуклонных реакций (КМФР) [6]. В случае относительных выходов для фотопротонных реакций на тяжелых изотопах теоретические значения, рассчитанные с использованием КМФР, значительно превышают результаты TALYS. Экспериментально полученные результаты лежат ближе к теоретической кривой по коду КМФР. Учет изоспинового расщепления в КМФР позволяет описать экспериментальные данные по реакциям с вылетом протонов в диапазоне энергий от 12 до 23 МэВ.

Список источников

1. F. A. Rasulova [et. al.], Chin. Phys. C **48**, 024002 (2024).
2. F. A. Rasulova [et. al.], Phys. Rev. C **111**, 024604 (2025).
3. F. A. Rasulova [et. al.], Chin. Phys. C **50**, 064003 (2026).
4. F. A. Rasulova [et. al.], Phys. Rev., C **112**, 054610 (2025).
5. A. Koning. TALYS-2.0: A Nuclear Reaction Program, User Manual (2023).
6. B. S. Ishkhanov, V. N. Orlin, Phys. Atom. Nucl. **78**, 557 (2015).

Analytical approach to the generation of angular momentum in spontaneous fission fragments

N. Ryzhkov^{1,2*}, T. Shneidman¹, A. Rahmatinejad¹, N. Antonenko^{1,3}, G. Adamian¹

¹ Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

² Branch of Moscow State University, Dubna, Russia

³ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

*e-mail: ryzhkov@theor.jinr.ru

Recently, a large set of experimental data on angular momenta of fission fragments has been obtained [1]. This includes the absence of correlations between angular momenta of fission fragments, as well as the sawtooth dependence of fragment angular momentum on its mass. To investigate these phenomena, we propose a model describing the generation of angular momentum of fission fragments as due to the angular vibrations in scission configuration. It is assumed that, after tunneling through the fission barrier, the nucleus can be represented by superposition of dinuclear systems (DNS) [2]. The angular motion in the DNS is treated quantum-mechanically [3], yielding the angular momentum distribution of DNS nuclei at scission configurations. An analytical expression for distribution of angular momenta of fission fragments is obtained. The main experimental phenomena are explained.

References

1. J. N. Wilson, D. Thisse, M. Lebois [et al.], *Nature*, **590**, 566 (2021).
2. A. Rahmatinejad, A. V. Andreev, A. N. Bezbakh, [et al.], *Int. J. Mod. Phys. E* **33**, 2441018 (2024).
3. T. M. Shneidman, A. Rahmatinejad, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, *Phys. Rev. C* **111**, 064621 (2025).

Полный и парциальные астрофизические S -факторы реакции ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$ в микроскопическом кластерном подходе

А. С. Соловьев

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия
e-mail: alexander.solovyev@mail.ru

Реакция ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$ представляет значительный интерес для ядерной астрофизики в качестве одного из важных процессов, входящих в цепочку реакций первичного нуклеосинтеза. В настоящей работе динамика данной реакции описывается в рамках микроскопического многоканального кластерного подхода в осцилляторном представлении [1–5]. Вычисляются полное и парциальные астрофизические S -факторы реакции. Показано, что состояние $3/2^+$ рассматриваемой пятинуклонной системы играет доминирующую роль в формировании низкоэнергетической зависимости полного астрофизического S -фактора. С ростом энергии проявляются также состояния $3/2^-$ и $1/2^-$. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с доступными экспериментальными данными.

Список источников

1. A. S. Solovyev, Phys. Rev. C **106**, 014610 (2022).
2. A. S. Solovyev, Eur. Phys. J. A **60**, 32 (2024).
3. A. S. Solovyev, Phys. At. Nucl. **87**, 112 (2024).
4. A. S. Solovyev, Eur. Phys. J. A **61**, 96 (2025).
5. A. S. Solovyev, Phys. At. Nucl. **88**, 32 (2025).

Определение вероятностей формирования предразрывных конфигураций в тройном делении ядер

Л. В. Титова*, А. Д. Юдаков, А. Р. Габитов, А. А. Шайкина

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: titova_lv@phys.vsu.ru

Актуальность исследования тройного деления ядер-актинилов обусловлена необходимостью понимания механизмов вылета легких заряженных частиц на стадии формирования шейки делящегося ядра. Экспериментально наблюдаемые угловые распределения третьих частиц указывают на их преимущественно экваториальную эмиссию, что требует теоретического описания предразрывных конфигураций с учетом деформаций осколков.

В рамках трехкластерной модели экваториального деления рассчитан полный потенциал V взаимодействия (кулоновского и ядерного) между предфрагментами деления. Кулоновская часть потенциала построена при учете квадрупольных деформаций предфрагментов. В качестве ядерного потенциала были использованы потенциал Вудса-Саксона с деформационным фактором $S(\beta_i, \beta_j)$ [1], потенциал проксимити [2] и потенциал Юкавы [3]. Проницаемость барьера тройного деления вычислялась в ВКБ приближении. Относительные выходы конфигураций определялись как отношение вероятностей прохождения барьера [4]. Вероятность формирования кластера в шейке оценивалась с помощью виртуального механизма тройного деления [5].

Расчет драйвинг-потенциалов ($V - Q$), где Q – энергия тройного деления, для различных предразрывных конфигураций и определение вероятностей формирования легких частиц (^4He , ^6He , ^{10}Be) в шейке ядра при низкоэнергетическом тройном делении ^{252}Cf (спонтанное) и ^{251}Cf (вынужденное тепловыми нейтронами). Построены драйвинг-потенциалы для конфигураций с вылетом ^4He , ^6He и ^{10}Be как без учета, так и с учетом равновесных квадрупольных деформаций предфрагментов. Показано, что учет деформаций снижает драйвинг-потенциал на 10–20 МэВ для ряда конфигураций (например, $^{150}\text{Ce} + ^{98}\text{Sr}$ и $^{148}\text{Ce} + ^{100}\text{Sr}$ в случае ^4He), что приводит к увеличению проницаемости кулоновского барьера на 4–5 порядков. Относительные выходы фрагментов перераспределяются: конфигурации, имевшие пренебрежимо малые вероятности в сферическом приближении, становятся значимыми при учете деформаций предфрагментов деления. С ростом массового числа легкой частицы (от ^4He к ^{10}Be) драйвинг-потенциалы возрастают, а вероятности деления снижаются. Для ^{10}Be учет деформаций повышает относительный выход на 3–4 порядка. Вероятности формирования легких частиц в шейке ^{252}Cf , рассчитанные по виртуальному механизму, продемонстрировали незначительное различие между сферическим и деформированным случаями для таких легких заряженных частиц как ^4He , ^6He , ^{10}Be .

Таким образом, учет квадрупольных деформаций предфрагментов принципиально важен для корректного описания вероятностей тройного деления, так как он существенно увеличивает проницаемость барьера и изменяет спектр наблюдаемых конфигураций. Полученные оценки вероятностей формирования кластеров в шейке согласуются с общими закономерностями и могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных по тройному делению ядер-актинилов.

Список источников

1. V. Yu. Denisov, Phys. Rev. C **91**, 024603 (2015)
2. K. Manimaran, M. Balasubramaniam, Eur. Phys. J. A **45**, 293 (2010).
3. K. P. Santosh, Sreejith Krishnan, Eur. Phys. J. A **52**, 108 (2016).
4. K. P. Santhosh, Sreejith Krishnan, B. Priyanka, IJMP E **24**, 1550001 (2015).
5. Л. В. Титова, Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия, **64** (2021).

Theoretical and experimental investigation on the optimization of accelerator driven subcritical reactors

T. N. Tran^{1,7,8*}, M. Paraipan^{1,2}, A. Abduvaliev³, A. Balabekyan⁴, O. V. Belov¹, F. H. Ergashev³,
V. M. Javadova¹, S. V. Korneev⁵, L. K. Kostov^{1,6}, J. H. Khushvaktov¹, S. A. Kulikov¹,
A. A. Solnyshkin¹, V. V. Sorokin⁵, S. I. Tyutyunnikov¹

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² Institute of Space Science, Magurele, Ilfov, Romania

³ Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

⁴ International Center of Advanced Studies Yerevan State University, Yerevan, Armenia

⁵ Joint Institute for Energy and Nuclear Research-Sosny, Minsk, Belarus

⁶ Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Sofia, Bulgaria,

⁷ Institute of Physics of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

⁸ Institute for Nuclear Science and Technology, VINATOM, Hanoi, Vietnam

*e-mail: chan@jinr.ru

A new approach for accelerator driven subcritical reactors (ADSR), focused on their use as efficient source of energy was developed [1], [2]. Active zones with larger dimensions offer the possibility to obtain the needed value of the effective multiplication factor k_{eff} with lower enrichment, allowing longer cycle and deeper actinides burning (15–20%) during the cycle. The working value of k_{eff} maintained in the range 0,985–0,988 with the help of control rods ensures a safe exploitation, avoids reaching the criticality during unprotected transients or core damage, and is sufficiently high to realize energy gain above 15. One of the most interesting finding concerns the possibility to use light ion beams as ${}^7\text{Li}$ or ${}^9\text{Be}$ with energy 0,25–0,3 GeV/n instead of 1–1,5 GeV protons.

The analysis of possible experiments meant to compare the energy efficiency of different beams showed that the most reliable results are obtained by measuring the fission distribution inside a large target. A suitable lead target LETASUR is presented. The study about the radiation exposure demonstrates that the shielding design of the experimental room SHINE allows safely using beam intensities of 10^9 p/s. Plans for further research activity are presented.

References

1. M. Paraipan, V. M. Javadova, S. I. Tyutyunnikov (2023). Nuclear Science and Engineering, **198**(1) 109 (2023).
2. M. M. Paraipan, I. A. Kryachko, V. M. Javadova [et al.], Phys. Part. Nucl. Lett. **19**, 129 (2022).

Время-проекционная камера для исследования характеристик спонтанного деления сверхтяжелых ядер

И. И. Уланова^{1,2*}, А. В. Исаев^{1,2}, И. Н. Изосимов¹, Г. Камински¹, О. Н. Малышев^{1,2}, Р. С. Мухин¹, Ю. А. Попов^{1,2}, Е. А. Сокол¹, А. М. Солнцев^{1,2}, А. И. Свирихин^{1,2}, В. И. Чепигин¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*e-mail: ulanova@jinr.ru

В работе исследуется возможность применения время-проекционной камеры [1] для регистрации распадов сверхтяжелых ядер. В среде Geant4 разработана модель детектирующей системы, включающая рабочий газовый объем, майларовое входное окно, конструктивно ориентированное на решения, применяемые на сепараторе GRAND [2], и опорную структуру плёнки. Проведено моделирование транспортировки ядер отдачи с учётом энергетического и пространственного разброса, их торможения в газовой среде Ar + C₄H₁₀ и последующего спонтанного деления. Эффективность регистрации определялась как доля событий, в которых оба осколка деления полностью останавливаются в активном объёме детектора. На основе варьирования давления рабочего газа и толщины входной плёнки с учётом механического ограничения по перепаду давления определена область допустимых рабочих параметров. По результатам моделирования определена область рабочих параметров и получена максимальная эффективность регистрации 22%. Рассмотрена перспектива интеграции TPC с системой SFiNx [3,4], расположенной в фокальной плоскости сепаратора SHELS [5], для одновременного измерения кинематических характеристик осколков деления и нейтронной множественности.

Список источников

1. M. Heffner [et al.], Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **759**, 50 (2014).
2. А. В. Еремин, А. Г. Попеко, А. И. Свирихин [et al.], Письма в ЭЧАЯ. **21**(3) (2024).
3. A. V. Isaev, A. V. Yeremin, N. I. Zamyatin [et al.], Physics of Particles and Nuclei Letters. **19**(1) 37 (2022).
4. A. V. Isaev, A. V. Yeremin N. I., Zamyatin [et al.], Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement. **14**(4), 835 (2021).
5. A. G. Popeko, A. V. Yeremin, O. N. Malyshev [et al.], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **376**, 140 (2016). – Proceedings of the XVIIth International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), Grand Rapids, MI, U.S.A., 11–15 May 2015.

Multi-agent modeling of collective dynamics in heavy nuclei fission

Y. Ivanskiy, A. Unzhakov*

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: a.unzhakova@spbu.ru

Multi-agent simulations using extended Vicsek-type model [1] translate microscopic nuclear dynamics into macroscopic nuclear dynamics in fission process by treating nucleons as interacting agents. Model links short-range nuclear forces to emergent clustering by demonstrating how nucleons driven by the attractive, short-range (N-N) interactions spontaneously organize into spatially localized subgroups. Traditional macroscopic-microscopic theoretical approaches treat the nucleus as a continuous-like medium. The Strutinsky Shell Correction Method successfully combines a liquid-drop-like continuous background with quantum shell effects to predict energy barriers, but it relies on an averaging process. Such averaging smooths out the underlying microscopic fluctuations inherent in the nucleonic system [2].

Multi-agent modeling of nonequilibrium and nonlinear dynamics in nuclear systems [3] describe how nucleons (protons and neutrons) behave when driven far from a stable, balanced state. Governed by strong forces and energy flows, they exhibit collective chaotic behavior, fluid-like instabilities, and phase transitions, rather than predictable, isolated particle interactions.

The effective nucleon-nucleon interaction for networked multi-agent system was developed in [4]. It is local, state-dependent, and based on the nearest-neighbor rule. In [5] for the first time Coulomb interaction was taken into account in heavy nuclei simulations.

In this work we study the interplay of short-range attractive nuclear forces and repulsive Coulomb forces in actinide region nuclei. The developed approach allows us to perform microscopic simulations of the fissioning system evolution in vicinity of the scission point in symmetrical valley in heavy nuclei fission.

References

1. I. Tarras [et al.], *Eur. Phys. J. E* **47**, 62 (2024).
2. Y. Aritomo [et al.], *Phys. Rev. C* **113**(2), 024616 (2026).
3. F. Sakata [et al.], *Proc. Int. Symp. On Nonequilibrium and Nonlinear Dynamics in Nuclear and Other Finite Systems*, Beijing, **8** (2001).
4. Y. Ivanskiy, A. Unzhakova, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **89**(8), 1302 (2025).
5. Y. Ivanskiy, A. Unzhakova, *LXXV Int. Conf. NUCLEUS-2025, Book of abstracts*, Dubna, **75** (2025).

Development of the evaluated cross sections database for (n, γ)-type reactions

N. A. Fedorov^{1*}, D. N. Grozdanov^{1,2}, P. S. Prusachenko¹, Yu. N. Kopatch¹, V. R. Skoy¹,
I. N. Ruskov^{1,2}, T. Yu. Tretyakova^{1,3,4}, P. I. Kharlamov^{1,3,4}, A. V. Andreev^{1,4}, C. Hramco¹,
P. G. Filonchik^{1,5} (and TANGRA collaboration)

¹ Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

² Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy (INRNE),

Bulgarian Academy of Sciences (BAS), Sofia, Bulgaria

³ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP),

M. V. Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

⁴ M.V. Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

*e-mail: nfedorov@jinr.ru

The study of characteristic γ -ray emission from fast neutron-induced reactions is crucial for both fundamental nuclear physics and applied research. It provides valuable information about nuclear structure and the probabilities of exciting specific nuclear states. Gamma-ray spectroscopy of products of reactions with fast neutrons (particularly around 14 MeV) is a prospective technique for investigating the elemental composition of materials.

To date, the most complete set of the γ -emission cross-sections in neutron-induced reactions is a INDC report made by Simakov et al. [1] in 1997 which contains set of experimental data and evaluated cross-sections values.

Since that time a number of experiments dedicated to γ -emission cross-sections measurements was made at GELINA [2], nELBE [3], CoGNAC [4] and TANGRA [5] projects that provide more accurate data in comparison with the previous measurements so a new evaluation is required.

In the proposed report an analysis of the EXFOR database with LLM application as well as subsequent evaluation of the cross-section values based on processed EXFOR data will be discussed.

This work was conducted with financial support from the Russian Science Foundation (grant no. 23-12-00239).

References

1. S. P. Simakov, A. Pavlik, H. Vonach [et al.], International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1998).
2. A. Negret [et al.], EPJ Web of Conferences **239**, 01005 (2020).
3. R. Beyer [et al.], Eur. Phys. J. A **54**, 4 (2018).
4. K. J. Kelly [et al.], NIM A, **1087**, 171453 (2026).
5. P. S. Prusachenko [et al.], At. Data Nucl. Data Tables **168**, 101781 (2026).

Multinucleon transfer reactions in ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{40,48}\text{Ca}$ + ${}^{197}\text{Au}$

A. V. Shakhov^{1*}, A. K. Azhibekov^{1,2}, S. M. Lukyanov¹

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

² Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

*e-mail: Shahov@jinr.ru

In the present work, multinucleon transfer reactions in interactions of ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{40}\text{Ca}$ and ${}^{48}\text{Ca}$ projectiles with ${}^{197}\text{Au}$ target nuclei at energies near the Coulomb barrier have been investigated. Particular attention is paid to the influence of projectile structure, one-neutron separation energy, and transfer reaction Q - values on nucleon transfer probabilities.

It is shown that the probability of neutron transfer strongly depends on the one-neutron separation energy S_{1n} of the projectile, as well as on the Q - values of the transfer channels. Weakly bound nuclei such as ${}^7\text{Li}$, exhibit enhanced neutron-transfer probabilities due to the low binding energy of the valence neutron and the extended spatial distribution of its wave function [1], [2]. In contrast, tightly bound nuclei including ${}^{12}\text{C}$, ${}^{40}\text{Ca}$ and ${}^{40}\text{Ar}$, are characterized by smaller one-neutron transfer cross sections and a more pronounced contribution from direct peripheral processes [3], [4]. A comparison between reactions induced by ${}^{40}\text{Ca}$ and ${}^{48}\text{Ca}$ projectiles has also been performed. For the neutron-rich ${}^{48}\text{Ca}$ nucleus, an enhancement of transfer channels is observed due to the neutron excess and favorable transfer Q -values [5].

The experimental results are compared with calculations performed within the framework of the semiclassical GRAZING model [6], which takes into account the peripheral character of the collision, excitation of collective states, and nucleon exchange between interacting nuclei. The analysis demonstrates that the model satisfactorily reproduces the energy dependence of one-neutron transfer cross sections near the Coulomb barrier.

In addition, experimental data for multinucleon transfer channels, including multiple-neutron transfer, have been obtained for the considered systems. This makes it possible to investigate sequential neutron transfer probabilities, pairing correlations, and collective effects in multinucleon exchange dynamics [7]. The obtained experimental data on one-neutron and multinucleon transfer reactions were analyzed within a unified approach using reduced interaction radii and barriers, see Eqs. (1) and (2) [8–10]. Such an approach makes it possible to trace the evolution of transfer mechanisms in reactions involving weakly bound and neutron-rich nuclei.

$$\sigma_{Red} = \sigma_{1n} / (A_P^{\frac{1}{3}} + A_T^{\frac{1}{3}})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$E_{Red} = E_{c.m.} / (Z_P Z_T / (A_P^{\frac{1}{3}} + A_T^{\frac{1}{3}})). \quad (2)$$

Список источников

1. F. Ajzenberg-Selove [et al.], Phys. Rev. C **17** 1283 (1978).
2. M. Prasanna [et al.], Eur. Phys. J. A **60** 220 (2024).
3. A. Yokoyama [et al.], Z. Phys. A **332** 61 (1989).
4. L. Corradi [et al.], Phys. Rev. C **59** 261 (1999).
5. A. K. Azhibekov [et al.], Eur. Phys. J. A **59** 278 (2023).
6. Resource is based on the Program Grazing ver.9 (2005) code of Aage Winther.
7. A. Parmar [et al.], Nucl. Phys. A **940**, 167 (2015).
8. Sunil Dutt [et al.], Phys. Rev. C **113**, 044625 (2026)
9. L. C. Chamon [et al.], Phys. Rev. Lett. **79**, 5218 (1997).
10. L. C. Chamon [et al.], Phys. Rev. C **66**, 014610 (2002).

Активная аргоновая защита в низкофоновых экспериментах по поиску двойного безнейтринного бета-распада GERDA и LEGEND

Е. А. Шевчик (от коллаборации LEGEND)

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
e-mail: shevchik@jinr.ru

Поиск двойного безнейтринного бета-распада является одним из основных направлений в современной физике частиц. Открытие такого явления поможет пролить свет на понимание природы нейтрино, а также объяснить барионную асимметрию Вселенной.

Одним из наиболее перспективных изотопов для поиска возможного двойного безнейтринного бета-распада является ^{76}Ge . В экспериментах GERDA [1] и LEGEND [2] обогащенные этим изотопом детекторы из особо чистого германия, работающие в жидком аргоне, являются источниками и детекторами одновременно. Благодаря своим сцинтилляционным свойствам жидкий аргон служит не только охладителем, но и активной детектирующей средой.

Эксперименты располагаются в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), где адронная, электронная и фотонная компоненты космических лучей полностью подавляются, а поток мюонов уменьшается на несколько порядков. Несмотря на многоуровневую систему пассивной защиты и эффективное подавление фона с помощью анализа формы импульса, данные методы не позволяют полностью избавиться от фона.

В докладе представлены принципы работы активной аргоновой защиты от фонового излучения в экспериментах GERDA и LEGEND, применение которых помогает достичь рекордно низкого уровня фона в исследованиях двойного безнейтринного бета-распада. Показаны основные характеристики созданных систем и их перспективы применения в будущих экспериментах.

Список источников

1. M. Agostini, E. Shevchik, GERDA Collaboration. Phys. Rev. Lett. **125**, 252502 (2020).
2. H. Acharya, E. Shevchik, LEGEND Collaboration. Phys. Rev. Lett. **136**, 022701 (2026).

Comparative study of simulated and measured isotope production in target and HPGe detector in muon capture experiments

A. Shehada*, D. Zinatulina

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: shikhada@jinr.ru

Precision determination of muonic X ray spectra from negative muon capture requires rigorous identification and subtraction of background γ ray lines arising from nuclear re-actions induced in the target material and in the high purity germanium (HPGe) detector itself. This work presents a systematic Monte Carlo (MCNP6) simulation study of isotope production channels in typical muon capture experiments, where negative muons (momentum 33–40 MeV/c) are stopped in solid targets (e.g., BaCO₃, Mo, Se, Ti). The simulations incorporate full three-dimensional geometry, particle transport for muons, neutrons, protons, electrons, and γ rays, and detailed nuclear data libraries.

Negative muon nuclear capture excites the daughter nucleus, which de-excites primarily by neutron evaporation (neutron energies up to 30–40 MeV) followed by γ ray cascades. In a BaCO₃ target (95% enrichment in ¹³⁶Ba), the simulations predict production of ¹³⁵Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁴Cs and ¹³³Ba with characteristic γ lines at 604.7 keV (¹³⁴Cs), 661.7 keV (¹³⁷Cs) and 818.5 keV (¹³⁶Cs). However, comparison with experimental γ spectra reveals peaks such as the peak 608.2 keV. The simulations identify these as originating from neutron induced reactions in surrounding structural materials and, crucially, within the HPGe crystal itself: 608.2 keV corresponds to ⁷⁴Ga (608.54 keV, (n,n') second level gamma) and background ²¹⁴Bi (609.31 keV).

A key result is the quantification of radioisotope production directly inside the HPGe detector. Fast neutrons from muon capture interact with germanium isotopes (⁷⁰Ge, ⁷²Ge, ⁷³Ge, ⁷⁴Ge, ⁷⁶Ge) via (n,n'), (n,2n), (n,p) and (n, γ) reactions, producing long lived activities: ⁶⁹Ge (39 h, 1107 keV), ⁷¹Ge (11.4 d, 198 keV), ⁷⁵Ge (82.8 min, 265 keV) and ⁷⁷Ge (11.3 h, 211 keV, 264 keV). These generate a time dependent background that cannot be eliminated by passive shielding or simple coincidence. Additionally, muon decay in orbit electrons (Michel spectrum up to 52.8 MeV, boosted to ~70 MeV) produce bremsstrahlung photons >11 MeV, which pair produce positrons whose annihilation yields γ rays up to 6–7 MeV, further complicating the high energy muonic X ray region.

The Monte Carlo approach successfully separates the measured spectrum into three components: (i) prompt muonic X rays and capture γ rays from the target, (ii) neutron induced background from the detector and surrounding materials, and (iii) natural terrestrial/cosmic background. Simulated total events in the 0–10 MeV range have good agreement with experimental data, validating the method. This work provides a framework for accurate background (induced and natural) gamma-rays identifications and subtraction, improving the extraction of ordinary muon capture rates and nuclear matrix elements for 0 $\nu\beta\beta$ decay. The methodology is extendable to other target nuclei like ¹⁰⁰Mo, ⁷⁶Se, ⁴⁸Ti.

References

1. D. Zinatulina [et al.], Phys. Rev. C **99**, 024327 (2019).
2. D. R. Zinatulina [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **72**, 737 (2008).
3. G. R. Araujo [et al.], Phys. Rev. C (accepted), (2026).
4. MCNP6 Manual, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-29981 (2017).

Учет кулоновской асимптотики в формализме осцилляторного представления теории рассеяния

У. М. Яников^{1,2*}, В. А. Куликов^{1,2}, А. М. Широков¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: yanikov-u@yandex.ru

Современные расчеты связанных состояний легких атомных ядер проводятся методами *ab initio* в рамках подхода No-core Shell Model (NCSM) [1]. Важнейшим направлением развития теории ядра является разработка методов *ab initio* для описания резонансных состояний ядер и ядерных реакций. Ключевым элементом таких расчетов является аккуратное описание асимптотик волновых функций непрерывного спектра сталкивающихся заряженных частиц, трудности которого обусловлены дальнедействующим характером кулоновского потенциала.

В настоящей работе исследуется асимптотика коэффициентов разложения по осцилляторному базису регулярного и нерегулярного решений кулоновской задачи рассеяния в рамках формализма осцилляторного представления теории рассеяния (по-английски Harmonic Oscillator Representation of Scattering Equations, или HORSE) [2]. Приведён строгий вывод асимптотического трехчленного рекуррентного соотношения (ТПС) для коэффициентов разложения, предложенного в работе [3]. Вывод основан на дельтаобразном характере осцилляторных функций вблизи классической точки поворота при больших значениях радиального квантового числа n [4].

Показано, что асимптотическое ТПС позволяет воспроизвести коэффициенты разложения как регулярного, так и нерегулярного решений кулоновской задачи с высокой точностью практически до радиального квантового числа $n = 0$. Для нерегулярного решения предложен метод построения регулярной функции $\tilde{G}_l(\eta, kr)$, совпадающей на асимптотике с нерегулярной кулоновской функцией $G_l(\eta, kr)$, как решения неоднородного уравнения Шредингера с использованием функции Грина кулоновской задачи. Проведено численное сравнение точных коэффициентов разложения с асимптотическими, продемонстрирована их хорошая согласованность.

Список источников

1. B. R. Barrett, P. Navrátil, J. P. Vary, Prog. Part. Nucl. Phys. **69**, 131 (2013).
2. J. M. Bang [et al.], Ann. Phys. (NY) **280**, 299 (2000).
3. I. P. Okhrimenko, Nucl. Phys. A **424**, 121 (1984).
4. С. А. Зайцев, Ю. Ф. Смирнов, А. М. Широков, ТМФ **117**, 227 (1998).

Секция 3
**Современные ядерно-физические методы,
технологии и установки**

Section 3
**Modern nuclear physics methods,
technologies and facilities**

Результаты экспериментов с тепловыми трубами с цезиевым теплоносителем

Е. К. Бурякова*, В. В. Сажнов, Н. А. Тесаловский, А. А. Щеглов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Россия

*e-mail: suyazova.elena@mail.ru

В настоящее время активно обсуждается возможность применения тепловых труб с жидкометаллическим теплоносителем для передачи тепла в составе перспективных энергетических установок, в том числе на основе ядерных реакторов малой мощности [1]. Проводятся экспериментальные исследования тепловых труб, включая исследования ограничений по передаваемой мощности, поведения при запуске из начального состояния, влияния ориентации в поле гравитационных сил и др. [2], [3].

В Институте ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ были проведены исследования тепловых труб и термосифонов (бесфитильные гравитационные тепловые трубы) с цезием в качестве теплоносителя. Устройства имели длину ~650 мм и наружный диаметр корпуса 20 мм.

Постановка экспериментов отличалась тем, что в аспекте ориентации на применение тепловых труб в составе энергетических установок были реализованы подвод и отвод тепловой энергии контактным способом. Основной объем экспериментов проведен при вертикальном расположении тепловой трубы (зона испарения ниже зоны конденсации).

Для всех исследованных тепловых труб был реализован близкий к стационарному режим работы при передаваемой мощности от 1,1 до 1,5 кВт. Передаваемая мощность определялась по результатам измерений перепада температуры в цилиндрическом радиаторе, установленном в зоне конденсации.

В докладе представлены условия и основные результаты проведенных экспериментов.

Список источников

1. B. H. Yan, C. Wang, L. G. Lee, Ann. Nucl. Energy **135** (2020).
2. Yang Ji, D. Yuan, Z. Che, J. Zhao, D. Tang, Zh. Zhang, Ann. Nucl. Energy **163** (2021).
3. Hong-Xia Chen, Yu-Xiang Guo, Da-Zhong Yuan, Yang Ji, Int. Commun. Heat Mass Transf. **138** (2022).

Криогенная газовая ячейка охлаждения ионов. Особенности конструкции, вакуумная система, система газового обеспечения, система охлаждения

В. Ю. Веденеев*, А. М. Родин, А. С. Новоселов, А. В. Гуляев, А. В. Гуляева, А. Б. Комаров,
А. В. Подшибякин, В. С. Саламатин, Е. В. Чернышева, С. А. Юхимчук

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: vvedeneyev@gmail.com

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создается новая экспериментальная установка для прецизионных измерений масс тяжелейших нуклидов (с относительной разрешающей способностью порядка $\Delta M/M \sim 10^{-7}$). Такая точность определения массы ядра необходима для определения полной энергии связи ядра – характеристики, которая является ключом к изучению таких фундаментальных физических вопросов как ядерная и астрофизика, физика фундаментальных взаимодействий, расположение протонных и нейтронных оболочек в ядре, описание процессов синтеза тяжелейших элементов.

Комплекс будет включать в себя блок с вращающейся мишенью, газонаполненный пресепаратор продуктов реакции, криогенную газонаполненную ячейку, квадрупольный гид, много-отражательный времяпролетный масс-анализатор. Одним из ключевых узлов такого комплекса является уже построенная и проходящая стендовые испытания криогенная газонаполненная ячейка охлаждения ионов продуктов реакций [1]. Ячейка является эффективным инструментом для преобразования потока высокоэнергетичных продуктов реакций в пучок ионов малой энергии (около 10 эВ) с малым энергетическим разбросом и эмиттансом пучка, подходящим для ввода в аналитическую часть спектрометра. В докладе представлены особенности конструкции и общей компоновки, вакуумная схема и схема подачи буферного газа, результаты по охлаждению ячейки и масс-спектрометрическому анализу остаточных газов, тестирования с внутренним источником-эманатором, а также дальнейшие планы по развитию комплекса.

Список источников

1. V. Yu. Vedeneev, A. M. Rodin, A. S. Novoselov [et al.], PEPAN. Experiment. **21**, 611 (2024).

Моделирование ионной оптики сепаратора STAR с помощью программы SHEMAT

В. Д. Данилкин, А. И. Свирихин, О. Н. Малышев, Ю. А. Попов, А. Г. Попеко

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

e-mail: donyvlad@gmail.com

Реакции мульти-нуклонных передач (МНП) с многозарядными ионами — перспективный метод получения нейтронообогащённых тяжёлых и сверхтяжёлых ядер [1], [2]. Продукты реакций МНП испускаются в широком угловом диапазоне вблизи угла грейзинга, и традиционные on-line сепараторы, работающие под нулем градусов для них малоэффективны. В рамках проектирования нового сепаратора STAR разработана программа SHEMAT, объединяющая моделирование методом Монте-Карло свойств продуктов реакций (испарение частиц, многократное рассеяние, энергетические потери, эффективный заряд частиц после углеродной обдирочной фольги) с расчетом траекторий частиц ионно-оптическим транспортом через все элементы сепаратора (квадруполи, дефлектор, диполи). Программа SHEMAT позволяет изменять конфигурацию сепаратора, визуализировать траектории ионов и вычислять трансмиссию продуктов реакций. Для реакции $U^{238} + Cm^{248} = Fl^{298}$ получена трансмиссия 55–60%, для $Bi^{209} + U^{238} = Db^{270}$ — 60–65%. Верификация по коду GICOSY [3] показала расхождение не более 10%. Программа уже использовалась для моделирования параметров продуктов реакций полного слияния, изучаемых на сепараторе SHELS [4] в реальном эксперименте. Таким образом, SHEMAT — эффективный инструмент для настройки оптики сепараторов ядер отдачи и планирования экспериментов по синтезу новых нейтронообогащённых изотопов.

Список источников

1. A. Karpov, V. Saiko, EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 163, 00027 (2017).
2. A. Karpov, V. Saiko, Phys. Part. Nucl. Lett. **16**, 667 (2019).
3. H. Wollnik, B. Hartmann, M. Berz, AIP Conference Proceedings. **177**, 74 (1988).
4. A. Yeremin [et al.], EPJ Web of conferences. EDP Sciences. **86**, 00065 (2015).

Исследование радиационной стойкости SiC- и Si-детекторов после облучения альфа-частицами

С. А. Евсеев^{1*}, Ю. Б. Гуров², М. С. Довбненко¹, Н. И. Замятин¹,
Ю. А. Копылов¹, С. В. Розов¹, Л. Грубчин³, Б. Затько³

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Институт электротехники Словацкой академии наук, Словакия

*e-mail: evseevsa@jinr.ru

Представлены результаты исследования полупроводниковых детекторов из карбида кремния (SiC-SCD) [1], [2] и кремния (Si-SCD). Облучение проводилось с использованием стандартного спектрометрического α -источника 226-Ra с энергиями $E = 4,8; 5,5; 6,0; 7,7$ МэВ. Толщина чувствительного слоя SiC-детекторов n-типа составляла 25 мкм и 50 мкм, а диаметр рабочей области – 3,0 мм. Исходное энергетическое разрешение детекторов составляло 25 кэВ. Si-детекторы были изготовлены по планарной технологии из кремния n-типа проводимости с рабочей площадью 7 мм² и чувствительной толщиной 300 мкм. Радиационная стойкость детекторов SiC и Si была исследована до и после облучения альфа-частицами при интегральных потоках до $\sim 2 \times 10^{11}$ $\alpha/\text{см}^2$. Было показано, что после облучения наблюдалась деградация: пики от альфа-частиц смещались в сторону нижних каналов и становились шире. Было обнаружено, что с увеличением дозы облучения энергетическое разрешение ухудшалось более, чем на порядок для SiC-ППД 50 мкм, в 4 раза для SiC 25 мкм и более чем в 2 раза для Si-ППД. В то же время эффективность сбора заряда (CCE) снизилась со 100% до 80% (рабочее напряжение 300 В) для SiC-ППД 50 мкм, со 100% до 90% (рабочее напряжение 200 В) для SiC-SCD 25 мкм и со 100% до 95% (рабочее напряжение 100 В) для Si-ППД при максимальной дозе облучения.

Список источников

1. S. A. Evseev [et al.], Phys. Atom. Nucl. **86** (5), 841 (2023).
2. Yu. B. Gurov [et al.], Instrum. Exp. Tech. **67** (6), 1095 (2024).

Нейтронные сцинтилляторы на основе кристалла ZnS(Ag)

И. Ю. Зимин^{1*}, Е. С. Кузьмин¹, Г. Д. Бокучава², А. А. Круглов², В. Л. Малышев¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

¹Лаборатория ядерных проблем имени В. П. Джелепова, Дубна, Россия

²Лаборатория нейтронной физики имени И. М. Франка, Дубна, Россия

*e-mail: zimin@jinr.ru

Кристаллы ZnS, активированные серебром используются в гетерогенных сцинтилляторах тепловых нейтронов. Световой выход и эффективность сцинтилляционных композитов зависит не только от использованных материалов, но и от оптических характеристик структур, построенных из компонентов с различными размерами и коэффициентами преломления. Из-за высокого коэффициента преломления кристалла ($n=2,4$) прозрачность композитов невелика, поэтому используются тонкостенные экраны, у которых эффективность регистрации тепловых нейтронов находится на уровне 20–30%. В работе проведены сравнительные исследования двух гетерогенных сцинтилляторов нейтронов на основе кристалла ZnS (Ag), отличающихся материалом, используемым для конверсии нейтронов и технологией изготовления. В первом из рассматриваемых сцинтилляторов – экране типа ND (Scintacor, UK) [1] в качестве конвертора используется ядро лития в составе кристалла ${}^6\text{LiF}$. Порошки кристаллов смешиваются и фиксируются полиметилметакрилатом в пластине толщиной 0,42 мм. Экран отличается высокой стоимостью из-за использования изотопно-чистого лития. Во втором случае, в сцинтилляторе ЛРБ-2 (ЗАО «НПФ Люминофор», г. Ставрополь) сульфид цинка спекается с оксидом природного бора и поставляется в виде порошка с размером частиц 300–700 мкм. Для измерений был приготовлен образец, в котором порошок ЛРБ-2 фиксировался силиконовым компаундом. Образцы сцинтилляторов экспонировались на пучке канала № 13 [2] реактора ИБР-2 и на стенде γ -квантами изотопа ${}^{60}\text{Co}$. В результате проведенных измерений были получены формы импульсов сцинтилляторов, постоянные высвечивания и амплитудные спектры. Время высвечивания сцинтиллятора ЛРБ-2 от максимума амплитуды до 10% уровня оказалось в три раза меньше, чем у экрана ND (400 и 1200 нсек) что позволяет значительно улучшить нагрузочную способность детектора. При регистрации γ -квантов время высвечивания сцинтилляторов от максимума до уровня 10% в ~ 25 раз меньше, чем при регистрации нейтронов. Это означает, что может быть проведена эффективная селекция событий захвата нейтрона от фона γ -квантов [3]. Среднее значение амплитудного распределения сигналов от образца ЛРБ-2 в два раза выше, чем у экрана ND, однако разрешение значительно хуже. Амплитудные характеристики композитных сцинтилляторов зависят не только от конверсионной эффективности сцинтиллятора, но и от его структуры и оптических свойств использованных материалов. Учитывая, что максимум амплитудного распределения от ЛРБ больше, чем у ND, можно предполагать, что оптимизация экрана на базе ЛРБ-2 даст возможность значительно улучшить характеристики амплитудного спектра.

Список источников

1. C. W. E. van Eijk [et al.], Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. A **529**, 260 (2004).
2. G. D. Bokuchava [et al.], J. Surf. Invest.:X-ray, Synchrotron Neutron Tech., **16** (2), 191 (2022).
3. C. L. Wang, A. Riedel, Review of Scientific Instruments. **87**, 013301 (2016).

Мюонная томография крупномасштабных объектов с применением компактных цилиндрических позиционно-чувствительных детекторов

А. В. Канцырев*, И. Г. Алексеев, А. В. Скобляков, Д. С. Колесников, А. А. Голубев, А. В. Богданов, С. А. Высоцкий, В. А. Волков, Р. О. Гаврилин, Е. М. Ладыгина, М. А. Лапшин, В. А. Панюшкин, Э. И. Самигуллин, Е. И. Тарковский, А. О. Хурчиев, А. С. Загоруйко

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: kantsyrev@itep.ru

Мюонная томография – это метод, использующий потоки мюонов космического происхождения, для получения мюографических изображений и трехмерных распределений плотности структуры крупномасштабных геологических [1], [2], [3] или промышленных объектов [4]. Недавно в России были разработаны компактные позиционно-чувствительные цилиндрические мюонные детекторы с длиной 1–2,5 м [1], [5] при внешнем диаметре <10 см. Цилиндрическая геометрия детектора позволяет проводить измерение потока мюонов и оценку плотности объектов вокруг позиции детектора в диапазоне азимутальных углов 360°. Масса детектора может составлять менее 5 кг [5], что позволяет легко транспортировать его при практическом применении для исследования промышленных зданий или объектов культурного наследия. Небольшой размер и масса, низкое энергопотребление и отсутствие движущихся частей открывает возможность применения таких детекторов в космических миссиях [6] по исследованию геологических структур и поиска воды на планетарных объектах солнечной системы, таких как Луна, Марс.

Прототип компактного позиционно-чувствительного цилиндрического мюонного детектора [5] разработан на основе трех вложенных цилиндрических слоев, на которых укладывается сцинтиллирующее волокно. На внутреннем и среднем слоях волокно укладывается спирально в противоположных направлениях под углом ~30°, на внешнем слое волокно размещается вертикально. Регистрация сцинтилляционного сигнала производится с помощью кремниевых фотоумножителей (SiPM) и компактной электронной схемы, построенной на основе FPGA и компараторов, с общим потреблением менее 20 Вт и накоплением данных на локальном твердотельном накопителе. Угловое разрешение детектора составляет ~20 мрад для диапазона зенитных углов 20–90°. С использованием разработанного виртуального генератора потока мюонов [5] и методики определения плотности, данные о статистике мюонов преобразуются в распределение плотности. Возможности трехмерной томографической реконструкции плотности продемонстрированы при размещении прототипа детектора внутри здания размерами 48–25–16 м (Д–Ш–В) в трех позициях на трех различных высотах на расстоянии друг от друга ~4,5 метра. Для трехмерной реконструкции пространственного распределения плотности использован модифицированный алгоритм SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique). Реконструированная плотность материала стен здания соответствует реальной для стен, изготовленных из кирпичной кладки. Точность определения позиции плотных элементов здания (стен) составила ~0,5 метра.

Список источников

1. A. A. Golubev, A. V. Kantsyrev et al., Rev. Sci. Instrum. 1 **96**(11), 115205 (2025).
2. Платформа Ideon. URL: <https://ideon.ai>.
3. G. Saracino [et al.], Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A **1048**, 167995 (2023).
4. N. A. Pasyuk [et al.], Tech. Phys. **69**(8), 1296 (2024).
5. A. V. Kantsyrev [et al.], LXXV Int. Conf. «NUCLEUS – 2025, Book of Abs., P. 112 (2025).
6. S. Kedar [et al.], Geosci. Instrum. Method. Data Syst. **2**, 157 (2013).

Нейтрон-нейтронные методы дистанционного контроля с использованием меченых нейтронов

М. Д. Каретников

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия
e-mail: MDKaretnikov@vniia.ru

Ключевым элементом для реализации метода меченых нейтронов (ММН) является нейтронный генератор с встроенным позиционно-чувствительным детектором альфа-частиц, позволяющим определять время и направление вылета 14 МэВ нейтрона, рождающегося вместе с альфа-частицей в реакции синтеза $T^3 + D^2 \rightarrow He^4 + n$. Большинство времяпролетных методов дистанционного контроля с использованием меченых нейтронов основаны на совместной регистрации гамма-квантов, возникающих при неупругом рассеянии меченых нейтронов, и сопутствующих нейтронам альфа-частицам. Рассеянные меченые нейтроны также несут информации о ядре-рассеивателе, поскольку при однократном акте рассеяния энергия нейтрона зависит от угла рассеяния θ как

$$E_n = \left(\frac{a}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + 4b} \right)^2,$$

где $a = \frac{2}{M+1} \sqrt{E}$, $b = \frac{M-1}{M+1} E - \frac{M}{M+1} U$, M – отношение массы ядра и нейтрона, U – энергия возбуждения ($U > 0$ при неупругом рассеянии и $U = 0$ при упругом). Таким образом, измеряя энергию нейтрона под разными углами θ относительно направления меченых нейтронов можно определять массу и энергию возбуждения ядра-рассеивателя. Эти измерения лежат в основе нейтрон-нейтронных методов для дистанционного контроля различных объектов. Основная мотивация развития нейтрон-нейтронных методов обусловлена следующими факторами:

- Возможностью измерения энергии нейтронов по времени пролета – не требуется дорогое спектрометрическое оборудование.
- Использованием более дешёвых (по сравнению с гамма-детекторами на основе неорганических сцинтилляторов) пластиковых детекторов нейтронов.
- Более высоким выходом «информативных» рассеянных нейтронов при их упругом рассеянии (по сравнению с выходом гамма-квантов при неупругом рассеянии нейтронов).
- Бóльшей проникающей способностью быстрых нейтронов в некоторых средах (по сравнению с гамма-квантами).
- Измерением содержания водорода по упругому рассеянию нейтронов.

Возможности нейтрон-нейтронных методов определяются параметрами (эффективностью регистрации, геометрией, временным разрешением и т.д.) и конструкцией детекторов нейтронов. В работе рассмотрено несколько вариантов детекторов нейтронов различных типов, которые предлагались для использования в устройствах с мечеными нейтронами, проанализированы их достоинства и недостатки.

Для установок нейтронно-активационного анализа на меченых нейтронах разработан экспериментальный нейтронный измерительный модуль на основе сцинтилляционных детекторов, сопряженных с SiPM, размещаемый на подвижной платформе трехосной системы позиционирования. Предполагается его использовать для измерения пространственного распределения меченых нейтронов из нейтронного генератора, в том числе при коллимации потока нейтронов нейтронной защитой, а также определения поглощения и рассеяния первичного потока нейтронов при экранировке и самоэкранировке облучаемых объектов для оценки достоверности результатов измерений.

Исследование эффекта наложения сигналов (pile-up) при регистрации атмосферных мюонов в нейтринном телескопе Baikal-GVD

М. Б. Ковалев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия
e-mail: kovalevmb@my.msu.ru

Одним из ключевых искажающих факторов при регистрации частиц является эффект наложения сигналов (pile-up), возникающий при попадании в детектор интенсивного потока частиц за время, сопоставимое с временным разрешением электроники. Минимизация таких искажений критически важна для нейтринного телескопа Baikal-GVD – одного из крупнейших инструментов подобного типа в мире. К 2026 году телескоп достиг проектной конфигурации, близкой к одному кубическому километру: введено 14 кластеров, 112 гирлянд, более 4000 оптических модулей. Эффективный объём регистрации составляет около 0.8 км³. Для моделирования отклика телескопа и исследования эффектов наложения использовался программный пакет NTSim. В теоретической части работы получено аналитическое выражение для вероятности регистрации двух и более мюонов за временное окно Δt . Корректность формулы проверена методом Монте-Карло. Разработаны три программы для анализа данных моделирования, осуществляющие визуализацию геометрии детекторов, построение гистограмм распределения фотоэлектронов и анализ временной структуры событий с построением матриц наложений. Полученные результаты позволяют количественно оценить долю детекторов с эффектом pile-up и могут быть использованы для коррекции экспериментальных данных телескопа Baikal-GVD.

Список источников

1. J. Liao [et al.], Nucl. Phys. Rev. **39** (1) 73 (2022).
2. A. D. Supanitsky [et al.], Astroparticle Physics (2008).

Реконструкция плотности многокомпонентных объектов в протонной радиографии с использованием метода роя частиц и преобразования Абеля

К. С. Лашин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: kslashin@vniief.ru

В работе рассматривается задача восстановления плотностных распределений многослойных объектов по данным протонной радиографии. В отличие от рентгеновской томографии, в протонной радиографии отсутствует однозначная связь между коэффициентом пропускания и плотностью вещества, что связано с конкурирующими процессами взаимодействия протонов с веществом. Это приводит к некорректности обратной задачи и необходимости применения численных методов оптимизации.

Реконструкция параметров объекта формулируется как задача минимизации функции невязки между экспериментальным/синтетическим и моделируемым изображениями. В качестве критерия используется среднеквадратичная ошибка (MSE). Моделируемое изображение строится на основе аналитического приближения коэффициента пропускания, зависящего от геометрических параметров и плотностей слоев [1], [2].

Для решения задачи применяется метод роя частиц (PSO), позволяющий эффективно исследовать многомерное пространство параметров. Метод протестирован на модельных объектах ФТО, смоделированных методом Монте-Карло в программе Geant4, а также на экспериментальном тестовом объекте. Показано, что использование стандартных физических констант приводит к систематическим ошибкам восстановления плотностей. Предложен подход, основанный на предварительной оптимизации эффективных констант взаимодействия протонов с веществом, что позволяет существенно повысить точность реконструкции, достигается точность меньше или порядка 1%.

Дополнительно рассмотрено применение преобразования Абеля для обработки протонограмм осесимметричных объектов с помощью метода, основанного на процедуре деконволюции с регуляризацией Тихонова, описанной в работе [3], для получения априорной информации о структуре объекта.

Таким образом, предложенный подход, использующий метод роя частиц и преобразование Абеля, является перспективным инструментом для решения задачи реконструкции плотности в протонной радиографии.

Список источников

1. D. Varentsov [et al.], arxiv: 1512.05644v2 [physics.ins-det]. 19.01.2016.
2. D. Varentsov [et al.], Physica Medica (2012), doi: 10.1016/j.ejmp.2012.03.002.
3. K. J. Daun, K. A. Thomson, F. Liu, G. J. Smallwood, Appl. Opt. **45**, 4638 (2006).

Особенности изучения свойств пучков тяжёлых ионов высоких энергий

Н. А. Мальцев, В. И. Жеребчевский, Е. О. Землин, В. В. Петров, Н. А. Прокофьев, А. О. Скалецкий

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: n.maltsev@spbu.ru

Точное знание смешанного поля излучения, возникающего при прохождении релятивистского пучка тяжёлых ионов через мишень, необходимо для экспериментов по облучению в радиобиологии, материаловедении и для решения ряда прикладных задач. В рамках коллаборации ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advance Development at NICA fAcility) на ускорительном комплексе NICA такой режим реализован на стенде длительного облучения. Стенд работает параллельно с установкой BM@N (эксперимент с выведенными пучками и неподвижной мишенью), используя пучок релятивистских ионов ускорителя НУКЛОТРОН. Пучок после взаимодействия с мишенью состоит в основном из первичных ионов, а также имеет небольшую долю ядерных фрагментов. Для оценки дозы и однородности облучения в области объекта исследования требуется мониторинг зарядового распределения и поперечного профиля пучка.

В данной работе для пособытийного измерения заряда фрагментов пучка после мишени, был использован телескоп на основе быстрых пластических сцинтилляционных детекторов, работающих в режиме совпадений. Такой подход позволяет решить две задачи: по счёту совпадений со сканированием в поперечной плоскости измерить пространственное распределение частиц пучка, а регистрация формы импульса тока, даёт информацию об энергетических потерях частиц пучка и фрагментов реакций. В свою очередь, энергетические потери позволяют оценить зарядовое распределение фрагментов пучка.

Проведен ряд экспериментов на пучках ионов ^{124}Xe с энергиями 1.6 ГэВ/нуклон на стенде длительного облучения ARIADNA на ускорителе НУКЛОТРОН. Было измерено пространственное распределение пучка. В ходе эксперимента проведена настройка режимов работы системы с целью оптимизации процедуры обработки данных. Анализ выборки сигналов с детекторов позволил построить амплитудные распределения, которые лежат в основе определения зарядовых распределений фрагментов пучка. Также, в работе представлены результаты экспериментов с выведенными пучками протонов с энергиями 200 МэВ и 1 ГэВ, проведенные на ускорителе СИЦ-1000 в НИЦ Курчатовский институт ПИЯФ. Получены зарядовые распределения, как протонов, так и фрагментов соответствующих ядерных реакций.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Измерение времени экстракции ионов из криогенной газовой ячейки охлаждения

А. С. Новоселов*, А. М. Родин, В. Ю. Веденеев, А. В. Гуляев, А. В. Гуляева, А. Б. Комаров, П. Когоут, А. Когоутова, А. В. Подшибякин, В. С. Саламатин, Д. А. Сизов, Е. В. Чернышева, С. А. Юхимчук

Лаборатория ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия
*e-mail: noval@jinr.ru

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, расположенного в г. Дубна Московской области, существует проект по созданию многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра MR-TOF для прецизионного измерения масс тяжелых и сверхтяжелых ядер. Необходимым условием работы установки является предварительная подготовка продуктов перед анализатором. Данная работа посвящена криогенной газовой ячейке охлаждения ионов [1], [2], назначение которой состоит в преобразовании высокоэнергичных с большим разбросом по энергии вторичных пучков продуктов ядерных реакций с достаточно большим поперечным изображением на входе в низкоэнергетические с малым энергетическим разбросом и существенно меньшим размером изображения на выходе. Ячейка создана и проходит стендовые испытания и отладку [3]. Наиболее важными параметрами для будущей экспериментальной работы являются эффективность и время экстракции охлажденных (термализованных) ионов из ячейки. В работе представлены методика и результаты измерений, полученные весной 2026 года как при комнатной, так и при криогенной температурах.

Список источников

1. V. Y. Vedeneev [et al.], Phys. Part. Nucl. Lett. **21**(4), 611 (2024).
2. A. Kohoutova [et al.], Phys. Part. Nucl. Lett. **21**(4) 701 (2024).
3. A. S. Novoselov [et al.], J. Phys. Conf. Ser. **2984**(1) 012024 (2025).

Измерение ионизационных выходов ядер отдачи в аргоне

В. П. Олейников^{1,2*}, М. А. Бакулев^{3,4}, А. Е. Бондарь^{1,2}, Т. А. Быков¹, М. Б. Громов^{4,5},
Д. А. Касатов^{1,2}, А. А. Лизунов^{1,2}, Т. С. Михеев^{1,2}, В. В. Носов^{1,2}, А. В. Соколов^{1,2},
Е. О. Соколова^{1,2}, Н. Д. Старцев¹, С. Ю. Таскаев^{1,2,5}, С. М. Чашин⁴, А. С. Чепурнов⁴

¹Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: V.P.Oleynikov@inp.nsk.su

Двухфазные (жидкость-газ) детекторы на основе аргона имеют хорошую чувствительность к относительно низким энергиям ядер отдачи (~1 кэВ), благодаря чему они широко используются в экспериментах ядерной физики и астрофизики. Эти детекторы могут быть масштабированы до массы рабочего вещества в десятки тонн, благодаря чему они используются для поиска WIMP. Для реконструкции энергии ядра отдачи по сигналу детектора необходимо знать ионизационный выход – отношение числа электронов, эмитированных из жидкости в газ, к энергии ядра отдачи. Для измерения ионизационных выходов лучше всего подходят нейтроны, имитирующие WIMP.

В Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера ведутся работы по измерению ионизационных выходов аргона на двухфазном детекторе. Измерения, проведенные ранее с пучком нейтронов с энергией 2,45 МэВ от нейтронного генератора на основе D-D реакции, имели относительно высокую энергию ядер отдачи, 233 кэВ [1]. Также, статистика в этих измерениях была недостаточной для требуемой точности. Для увеличения статистики измерений и возможности работы с более низкими энергиями ядер отдачи было решено использовать ускорительный источник нейтронов ВИТА в ИЯФ СО РАН, используемый для развития методики бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [2], [3]. Было проведено две серии тестовых измерений, где вместо двухфазного детектора был установлен сцинтилляционный детектор на основе монокристалла стильбена и ФЭУ. Были определены пороги регистрации нейтронных счетчиков и квенч-факторы стильбеновых кристаллов. Выполнено Монте-Карло моделирование энергетических спектров рассеянных нейтронов, которое показало хорошее согласие с экспериментом.

Ведется подготовка к проведению следующей фазы эксперимента: увеличение светосбора двухфазного детектора и размещение его в бункере ускорительного источника нейтронов ВИТА. Для увеличения светосбора детектора планируется покрыть всю его поверхность смесителем спектра тетрафенилбутадиеном (ТФБ). Проведен цикл работ по измерению эффективности переизлучения ТФБ и исследованию эффектов старения. Для увеличения чувствительности к оптическим сигналам сцинтилляции планируется размещение дополнительной матрицы фотодетекторов, состоящей из кремниевых фотоумножителей (КФЭУ) ArrayC-60035-4P-BGA. Для данных КФЭУ было измерено усиление, вероятность перекрестных наводок и скорость счета темновых шумов при криогенной температуре.

Список источников

1. А. Е. Bondar [et al.], Siberian Physical Journal. **12**, 3 (2017).
2. С. Ю. Таскаев, Ускорительный источник нейтронов. ВИТА. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2024. 248 с.
3. S. Taskaev [et al.], Preprint 202605.0884 (2026).

Development of machine learning tool for photon identification using the electromagnetic calorimeter at SPD detector

G. E. Petrov*, E. Yu. Soldatov

National Research Nuclear University «MEPHI», Moscow, Russia
e-mail: grigoriy.6.petrov@gmail.com

This work presents the development and optimization of photon identification algorithms for the electromagnetic calorimeter of the SPD experiment at the NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). One of the key tasks of the electromagnetic calorimeter in the SPD experiment is the detection of prompt photons used to study the gluon structure of nucleons. The main background for such processes originates from neutral mesons, primarily π^0 mesons, decaying into two photons. The challenge arises when two photons from a high momentum π^0 , with a small opening angle between them, produces a single cluster in the calorimeter practically indistinguishable from the cluster produced by a single (prompt) photon using only kinematic information. The number of such clusters is significant. This work is specifically devoted to the separation of such clusters from the single photon ones.

In order to achieve separation of signal from background, variables used in the ATLAS experiment for this purpose were adapted to the SPD calorimeter in this work. Information and variables from previous studies were also incorporated here. The work investigates two classification approaches: the fixed Rectangular Cuts method and the BDT (Boosted Decision Trees) method. A detailed study and optimization of both approaches were carried out for the considered task. For each classifier, variable ranking and selection were performed in order to improve classification performance.

It is shown that the best results under identical conditions are achieved using the BDT classifier with a combined set of parameters. The resulting ROC AUC (Receiver Operating Characteristic Area Under Curve) for BDT is 0.906 and the resulting ROC AUC for Rectangular Cuts is 0.877. As a result of this study, two working points with photon identification efficiencies of 80% and 90% were defined. The corresponding background rejection rates for BDT (Rectangular Cuts) are 84% and 78% (78% and 71%), respectively.

Низкофоновый детектор нейтронов на основе гелия-3

С. В. Розов*, С. А. Евсеев, В. В. Казалов, Д. В. Пономарев, Е. А. Якушев, И. И. Камнев,
С. В. Казарцев, Н. С. Горшков, К. В. Антохина

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: rozovs@jinr.ru

Представлены характеристики детектора для измерения низких потоков тепловых нейтронов, созданного на основе пропорционального счетчика с гелием-3. Дано описание разработанного метода нанесения покрытия на внутреннюю поверхность счетчика для снижения собственного альфа-фона. Представлены результаты измерения потока тепловых нейтронов в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Показано, что с помощью разработанного детектора можно регистрировать поток тепловых нейтронов на уровне 10^{-5} нейтронов·см⁻²·с.

Критический стенд «П»: современное состояние, особенности и роль исследований для развития технологии ВВЭР

С. В. Семенов*, А. М. Осипов, С. В. Цыганов, А.-Н. В. Вуколова, А. Н. Пекшев
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: Semenov_SVL@nrcki.ru

Данная статья является обзорной на исследовательскую экспериментальную ядерную установку – критический стенд «П», используемую НИЦ «Курчатовский институт» для решения современных задач, применительно к проведению экспериментальных исследований в поддержку реализации современных технологий для водо-водяных энергетических реакторов.

Критический стенд «П» спроектирован и создан в составе экспериментальной базы для исследования физики энергетических реакторов типа ВВЭР на территории ИАЭ имени Курчатова по Постановлению ЦК КПСС и СМ СССР № 315-112 от 29.04.1969г.

Критический стенд размещен на территории НИЦ «Курчатовский институт», сооружен по проекту ГСПИ, принят в эксплуатацию государственной приемной комиссией 17 июля 1987 года.

В 2016-2020 годах стенд прошел модернизацию системы управления и был принят в эксплуатацию после модернизации. Действующая лицензия ГН-03-109-4989 от 17.02.2026 года

Критический стенд (КС) «П» является универсальным и предназначен для проведения экспериментов по исследованию уран-водных размножающих систем различного типа. Конструкция КС позволяет проводить исследования активных зон твэльных и кассетных (ТВС) формаций.

В общем виде схема представляет собой полый бак, внутри которого расположены исследуемая система, состоящая из заданной конфигурации твэл или ТВС с урановым топливом.

Выход в критическое состояние может осуществляться как путем увеличения уровня замедлителя, так и извлечением рабочих органов системы управления и защиты

Максимальная мощность стенда ограничена величиной до 200 Вт, или максимальный потоком тепловых нейтронов $5 \cdot 10^7$ н/см²·с

На текущий момент данный стенд регулярно используется для проведения фундаментальных исследований посвященных изучению размножающих свойств систем с урановым топливом. Путем изменения конфигурации систем с ядерным топливом, достигается изменение уран-водного соотношения, изучаются эффекты гетерогенности, вызванные наличием водяных полостей или замещением различных твэл имитаторами из других материалов.

Данные исследования будут использованы как фундаментальная база для валидации и верификации программ для ЭВМ, используемых для обоснования проектных решений в целях реализации технологии с изменением спектра нейтронов или осуществления возможности регулирования с учетом РО СУЗ, выполненным из различным материалов.

Так же допустимая мощность стенда позволяет эффективно исследовать различных конфигураций передовых контрольно-измерительных приборов нейтронного потока. Открытая конфигурация стенда позволяет без больших усилий осуществлять быстрые изменения исследуемой системы и наработку экспериментальной базы для обоснования направления дальнейших исследований.

Физическая структура кросс-толка гамма-квантов в сферических МНГО-детекторных сцинтилляционных системах

О. В. Сидорова ^{1,2*}, Ш. С. Зейналов ¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*e-mail: sidorova@jinr.ru

Кросс-толк гамма-квантов – регистрация одного фотона в нескольких детекторах плотно-упакованной сборки — является источником ложных множественных срабатываний в экспериментах по физике деления. Ранее авторами были выполнены расчеты нейтронного кросс-толка различной кратности для сферической 32-детекторной геометрии [1]. В настоящей работе представлен систематический Монте-Карло анализ физических механизмов, формирующих структуру гамма-кросс-толка в модельной 32-детекторной системе на основе жидких сцинтилляторов [2]. Расчеты выполнены в беспороговом приближении, что позволяет выделить чистые закономерности явления без влияния аппаратурных факторов.

Показано, что в сферической геометрии относительные вклады групп детекторов в кросс-толк не зависят от энергии фотона в диапазоне 100–1500 кэВ – геометрический фактор доминирует над энергетической зависимостью углового распределения Клейна-Нишины. Обнаружено, что средняя энергия кросс-толка в детекторах обратного рассеяния существенно ниже теоретического предела для однократного рассеяния назад, что указывает на определяющую роль многократного рассеяния в целевом детекторе. Эмпирическая зависимость средней энергии кросс-толка от энергии первичного фотона для всех групп детекторов близка к пропорциональной корню из энергии. Корреляционные карты энерговыделений в целевом и кросс-толковом детекторах демонстрируют характерную треугольную структуру с физически интерпретируемыми границами, включая зону обеднения, связанную с переходом к доминированию фотоэффекта при малых остаточных энергиях. Выполнено сравнение для двух типов жидких сцинтилляторов (EJ-309 и BC-501A), показана универсальность полученных закономерностей. Проведена свертка карт с экспериментально измеренным энергетическим разрешением [3], подтверждающая устойчивость структур к аппаратному размытию.

Список источников

1. O. V. Sidorova, Sh. S. Zeynalov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **88**, 1262 (2024).
2. Eljen Technology, EJ-301, EJ-309 Data Sheet. URL: <https://eljentechnology.com/products/liquid-scintillators/ej-301-ej-309>.
3. Sh. S. Zeynalov, O. V. Sidorova, D. B. Berikov [et al.], Eurasian J. Phys. Funct. Mater., in press.

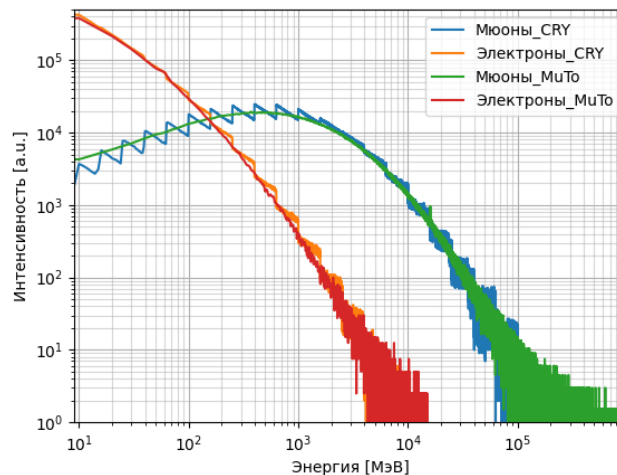
Виртуальный генератор потока атмосферных мюонов в варьiruемом диапазоне энергий до 100 ТэВ

А. В. Скобляков*, А. С. Загоруйко, А. В. Канцырев, И. Г. Алексеев, А. А. Голубев

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: dinAlt220@yandex.ru

В представленной работе разработан универсальный виртуальный генератор потока атмосферных мюонов и электронов (MuTo) на уровне моря. Генератор MuTo предназначен для Монте-Карло моделирования работы мюонных детекторов в областях мюонной радиографии и томографии крупномасштабных объектов и геофизики [1], [2], а также для калибровки детекторов частиц в экспериментах по физике высоких энергий. Доля мюонов космического происхождения от полного потока при энергиях меньше 1 ГэВ составляет около 20%, поэтому в случае использования детекторов мюонов на поверхности земли при исследовании крупномасштабных объектов или на небольших глубинах в грунте необходимо учитывать низкоэнергетическую часть мюонного спектра. Также на поверхности необходимо учитывать поток электронов, доля которых составляет около 20–30% от полного потока заряженных частиц. В процессе разработки виртуального генератора потока мюонов, в среде Монте-Карло моделирования Geant4, была создана полномасштабная модель атмосферы Земли высотой ~ 31 км. Для учета потока мюонов в диапазоне $1 < E < 10^5$ ГэВ используется аналитическое выражение. Отличительной особенностью созданного генератора MuTo является возможность моделировать поток мюонов в варьiruемом диапазоне энергий от E_0 до 10^5 ГэВ, где E_0 – варьiruемый энергетический порог, что значительно сокращает время моделирования в сравнении с традиционными генераторами. Была проведена валидация созданного генератора MuTo при сравнении модельного углового распределения потока мюонов и электронов с экспериментальным, полученным с помощью позиционно-чувствительного цилиндрического детектора мюонов [2], а также при сравнении энергетических и угловых спектров мюонов и электронов с программным генератором CRY [3] (рисунок).



Сравнение спектров потоков мюонов и электронов, полученных с помощью генератора CRY и MuTo

Список источников

1. A. A. Golubev, A. V. Kantsyrev [et al.], Rev. Sci. Instrum. **196**(11), 115205 (2025).
2. A. V. Kantsyrev [et al.], LXXV Int. Conf. «NUCLEUS – 2025, Book of Abs., P. 112 (2025).
3. Physics Simulation Packages. URL: <https://nuclear.llnl.gov/simulation/main.html> for CRY.

Average spatial resolution of detector layers of four-layer position-sensitive detectors

I. B. Smirnov

Petersburg Nuclear Physics Institute
of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia
e-mail: smirnov_ib@pnpi.nrcki.ru

This report presents the results of a follow-up study reported at the previous NUCLEUS-2025 conference [1], [2]. This study examined mathematical methods for reconstructing the spatial resolution of multilayer position-sensitive detectors designed to detect fast charged particles. It was assumed that reference detectors with known resolution are not available. Therefore, it was necessary to obtain measurement errors from measurements with unknown errors. Particular attention was paid to four-layer detectors, because this is the most complex case, and also because there are many experiments, including the experiment planned at PNPI [3], with detectors consisting of four layers.

The previous report demonstrates that it is impossible to obtain the individual layer resolutions of four-layer detectors by analysis of variances and covariances of residuals of fitting trajectories to hits in these detector layers. But it is possible to obtain the exact average resolution (the square root of averaged layer variances) of detecting layers of the symmetric four-layer detector, as well the exact average resolution of two outer and two internal layers of the symmetric four-layer detector. If the detector is not exactly symmetric, only the weighted averages can be obtained. They are also exact averages, but they average the weighted components with slightly non-equal weights. Since detectors designed to be symmetric may have some misalignment, and some detectors may be inherently asymmetric in design, average values of this type are most useful in practice. If the actual coordinates of layers are known or reconstructed using data analysis, it is more correct to use formulas that take into account arbitrary layer coordinates, since calculating average resolution estimates using formulas that assume exact symmetry can lead to unexpected errors in cases where symmetry is violated. In most cases, the corresponding general solutions are very cumbersome expressions, which are difficult to work with manually. But it turns out that there is one case for which it is possible to obtain sufficiently short expressions that can be printed and directly used to analyze experimental data. In this report these expressions will be presented.

References

1. I. B. Smirnov, Reconstruction of spatial resolution of multilayer position-sensitive detectors. LXXV International Conference «NUCLEUS-2025, Nuclear physics, elementary particle physics and nuclear technologies», 1-6 July 2025, St. Petersburg State University, Russia.
2. I. B. Smirnov, Phys. Part. Nucl. **57**(2), 224 (2026).
3. A. A. Vorobyev, Phys. Part. Nucl. Lett. **16**, 524 (2019).

Применение диджитайзеров CAEN-XX42 для регистрации заряженных частиц

О. В. Стрекаловский*, А. О. Жукова, В. Е. Жучко, А. Н. Солодов, Ю. М. Серeda

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: stroleg1@yandex.ru

Более 10 лет применения многоканальных сверхскоростных диджитайзеров фирмы CAEN V1742 (DT7542) в ЛЯР ОИЯИ показали их плюсы и минусы при использовании в качестве регистрирующих устройств для время-пролетных спектрометров заряженных частиц [1], [2]. Скорость оцифровки 5 ГГц позволяет зарегистрировать форму сигнала с применяемых детекторов (длительностью до 200 нс), а цифровые методы временной привязки обеспечивают измерение временных интервалов с точностью на уровне десятков пс.

Описаны разработанные оригинальные программы для работы с диджитайзерами, позволяющие настраивать параметры, управлять процессом сбора и накопления данных, и просто превратить каждый измерительный канал в анализатор импульсов с разрешением 12 бит.

Список источников

1. Yu. V. Pyatkov, D. V. Kamanin, V. E. Zhuchko [et al.], Phys. Part. Nucl. Lett. **22**, 312 (2025).
2. O. V. Strekalovsky, D. V. Kamanin, Yu. V. Pyatkov, A. O. Strekalovsky. Electronics of the fission fragments spectrometer COMETA-f. The 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC 2019), 30 September-4 October 2019, CEUR Workshop Proceedings. **2507**, 376 (2019).

Performance and light yield of CsI(PURE) scintillation module prototypes at LN₂ temperature

A. Strizhak^{1,2*}, A. Baranov¹

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

*e-mail: strizhak@inr.ru

We present a modular scintillation detector concept under development at the Institute for Nuclear Research (INR RAS) designed to detect low-energy neutrino-induced recoil electrons with sub-keV energy thresholds. Our approach utilizes pure cesium iodide (CsI(pure)) scintillation crystals coupled with SiPM for readout. This talk focuses on the performance and exceptional light yield of the already produced scintillation modules under cryogenic operation. By cooling the modules to liquid nitrogen (LN₂) temperatures, the CsI(pure) crystals achieve an outstanding light yield of up to 120 photons per keV. This high light output, combined with the drastic suppression of SiPM dark count rates at cryogenic temperature, allows the modules to resolve energy depositions down to a few hundred eV. We will present the systematic characterization of the fabricated modules' behavior, including scintillator performance and DCR temperature. Our experimental results validate the detector's feasibility and highlight the potential of LN₂-cooled CsI(pure) modules as a promising pathway for a wide range of low-energy neutrino physics experiments.

Пластмассовые сцинтилляторы с возможностью разделения частиц по форме импульса

И. А. Суслов^{1, 2*}, И. Б. Немченко^{1, 2}, В. Н. Швецов^{1, 2}, С. Нуруев¹,
И. И. Камнев¹, А. Д. Быстрыков^{1, 2}, Т. М. Козин²

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*e-mail: ivsuslov@jinr.ru

Одним из интересных свойств пластмассовых сцинтилляторов (ПС), которое можно придать им модификацией состава, является возможность разделения частиц по форме импульса (в английской терминологии pulse shape discrimination (PSD)) [1]. Такие материалы находят широкое применение, в качестве замены монокристаллов стильбена, в регистрации быстрых нейтронов в условиях смешанных полей нейтронного/гамма (n/γ) – излучения, в вето-системах и других задачах. Первые работы по методам получения таких материалов, суть которых состоит в увеличении концентрации первичной сцинтилляционной добавки $>30\%$, появились в 2012 году и исследования продолжаются в настоящее время [1–4]. Результатом их работ является выпуск первых коммерческих пластмассовых сцинтилляторов с возможностью PSD компанией Eljen Technology [5]. Кроме того, существуют альтернативные методы получения ПС с возможностью PSD [6–8]. Однако, несмотря на накопленный опыт в области получения таких материалов существует необходимость модификации их состава с целью улучшения оптических, сцинтилляционных и механических характеристик. Существующие коммерческие продукты, обладающие отличными сцинтилляционными свойствами, в настоящий момент труднодоступны для приобретения. В связи с этим, востребовано создание отечественных, коммерчески доступных аналогов для решения проблем фундаментальной и прикладной физики.

В работе воспроизведены методы получения пластмассовых сцинтилляторов с возможностью PSD с использованием повышенной концентрации первичной сцинтилляционной добавки и с введением двух первичных сцинтилляционных добавок. В качестве основы использован поли(стирол-со-дивинилбензол), в качестве первичных сцинтилляционных добавок 2,5-дифенилоксазол, пара-терфенил, смесь изомеров диизопропилнафталина и дифенил. Измерены характеристики полученных образцов ПС – световойход, коэффициенты пропускания, фактор разделения и механическая прочность. Определено оптимальное содержание дивинилбензола для достижения лучших характеристик ПС. Показано, что лучшие показатели достигаются для образца с составом **40% PPO, 0,2% PPOP**, световойход составил – **1,12±0,05**, коэффициент пропускания (оптический путь 1 см) на длине волны 430 нм – **0,72±0,02**, фактор разделения для n/γ – излучения – **3,65±0,13**, механическая прочность по шкале Шора D – **48±2**. Полученные результаты сравниваются с образцом EJ276D [5] и литературными данными [4].

Список источников

1. N. Zaitseva [et al.], Nucl. Instr. Methods. A **668**, 88 (2012).
2. N. Zaitseva [et al.], Nucl. Instr. Methods. A **789**, 8 (2015).
3. N. Zaitseva [et al.], Nucl. Instr. Methods. A **889**, 97 (2018).
4. N. Zaitseva [et al.], Nucl. Instr. Methods. A **1082** 171077 (2026).
5. Eljen Technology. URL: eljentechnology.com.
6. M. J. Ford [et al.], Nucl. Instr. Methods A **1036**, 166854 (2022).
7. P.L. Feng [et al.], Trans. Nucl. Sci. **59**(6), 3312 (2012).
8. V. Todorov [et al.], Measurement. **231**, 114554 (2024).

Влияние ^{222}Rn на расчёт радиоуглеродного возраста древесных углей

В. И. Цыганкова¹, Д. В. Петров¹, Г. К. Павлюков^{1,2}, С. Л. Вартанян¹

¹ Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт, Магадан, Россия

² Институт биологических проблем Севера, Магадан, Россия

*e-mail: tsigankova.valeriya@mail.ru

Экспериментальным путём установлено, что при хранении образцов древесного угля в открытом доступе происходит необратимое накопление свинца-210 (^{210}Pb) – долгоживущего дочернего продукта распада радона-222 (^{222}Rn). Причиной служит высокая сорбционная способность пористой структуры угля [1], [2]. Присутствие накопленного ^{210}Pb искажает результаты измерений общей активности образца, что ведёт к существенному занижению радиоуглеродного возраста. В ходе экспериментов с хранением углей в разных условиях (подвальное помещение, лаборатория, открытая местность) было подтверждено: удельная активность возрастает, а расчётный возраст уменьшается. На основе этого сделан вывод: для получения надёжных радиоуглеродных датировок по древним углям предпочтительно использовать метод ускорительной масс-спектрометрии (AMS), так как он не чувствителен к посторонним изотопам с энергиями, близкими к энергии ^{14}C . Если же применяется жидкостно-сцинтилляционный метод, образцы необходимо хранить в герметичной таре, полностью исключая контакт с окружающей средой.

Список источников

1. L. C. Bornemann [et al.], Chemosphere. **67** (5). 1033 (2007).
2. C. Wedler [et al.], Fuel. **275**, 117845 (2020)

Исследование распределения поглощённой дозы в полимерных материалах при облучении ускоренными электронами

П. А. Шимко^{1*}, С. А. Золотов¹, У. А. Близнюк^{1,2}, И. А. Родин^{1,3}, А. П. Черняев^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³МИРЕА – Российский технологический университет, Москва, Россия

*e-mail: pashashimko0306@gmail.com

Радиационная модификация ускоренными электронами широко применяется в производстве термоусаживающихся полимерных изделий с целью [указать цель, например: формирования пространственной трехмерной сетки (сшивки) полимера и улучшения его физико-механических свойств]. Качество радиационной сшивки материала определяется величиной поглощенной дозы и равномерностью ее распределения в объеме изделия [1]. Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование и экспериментальная оценка однородности распределения поглощенной дозы в полимерных трубках различного диаметра при варьировании конфигурации их укладки в процессе облучения пучком ускоренных электронов. Экспериментальные исследования проводились в центре радиационной обработки «Axenter» (г. Дубна) на промышленном линейном ускорителе электронов Mevex (радиационно-технологическая установка УЭЛР-10-20С) со следующими характеристиками: эффективная энергия пучка составляет 9,8 МэВ, средний ток пучка электронов – 2,0 мА, частота следования импульсов – 472 Гц, ширина развертки пучка – 40 см, высота развертки – 15 см, а скорость движения конвейера – 2,8 м/мин. Облучение образцов выполнялось с одной стороны.

Объектами исследования выступали термоусаживающиеся трубки марок V1(к) 36/55×9-1400 (красного цвета) и V1(4) 45/59×7-1400 (черного цвета). Согласно маркировке изделий, геометрические размеры трубок составляют: для первой марки – внутренний диаметр 36 мм, диаметр после усадки 55 мм и толщина стенки 9 мм; для второй марки – внутренний диаметр 45 мм, диаметр после усадки 59 мм и толщина стенки 7 мм. Длина трубок обеих марок составляет 1400 мм. Материалом исследуемых трубок является полимерная композиция (полиолефины), плотность которой для данного класса термоусаживаемых материалов обычно составляет порядка 0,92–0,95 г/см³.

Для теоретического анализа распределения поглощенной дозы в пакете Geant4 была разработана полномасштабная модель радиационной установки, воспроизводящая геометрию облучения, взаимное расположение полимерных трубок и физические параметры электронного пучка. Расчеты переноса излучения выполнялись методом Монте-Карло с использованием физического списка (physics list) QBBC и набора прецизионных электромагнитных моделей Livermore. В ходе проведенных исследований было экспериментально и теоретически подтверждено, что для трубок марки V1(к) 36/55×9-1400 в укладке со скоростью конвейера 2,8 м/мин достигается целевой уровень поглощенной дозы и обеспечивается требуемая равномерность ее распределения в объеме изделий согласно ТЗ № 8 от 16.07.2025. Однако при облучении трубок марки V1(4) 45/59×7-1400 в центральной части укладки зафиксирован эффект локального возрастания дозы, приводивший к риску переоблучения образцов в центральном слое. Данный эффект обусловлен геометрическими особенностями образцов и взаимодействием электронного пучка с материалом, в связи с чем для исключения переоблучения исключительно для этой конфигурации рекомендован переход на измененную укладку «2 на 2».

Сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных пленочной дозиметрии (выполненной с помощью дозиметров СО ПД(Ф)Р 5/50 по ГОСТ 8.651-2016) продемонстрировал их удовлетворительное согласие, что подтверждает высокую точность расчетов и адекватность разработанной в пакете Geant4 численной модели. Полученные результаты доказывают высокую прогностическую способность модели, которая может быть рекомендована для дозиметрического планирования процессов радиационной модификации полимеров, оптимизации параметров РТУ УЭЛР-10-20С (при энергии 9,8 МэВ, токе пучка 2,0 мА и частоте 472 Гц) и минимизации дозовой неоднородности в изделиях сложной геометрии.

Список источников

1. A. G. Chmielewski, A. J. Berejka Applications of Radiation Chemistry in the Production of Polymer Materials. IOP Publishing, 2020.
2. ГОСТ 8.651–2016. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики дозиметрии электронного и тормозного излучений.

Секция 4

**Релятивистская ядерная физика,
физика элементарных частиц
и физика высоких энергий**

Section 4

**Relativistic nuclear physics, particle physics
and high-energy physics**

Source velocity in collisions of 2.1 GeV and 3.6 GeV protons with gold target

S. P. Avdeyev^{1,2*}, W. Karcz¹, Z. Igamkulov^{1,3}, G. D. Milnov^{1,2}, P. A. Rukoyatkin¹,
V. I. Stegaylov¹, A. S. Botvina⁴

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Dubna State University, Dubna, Russia

³Jizzax Politehnika Instituti, Jizzakh, Uzbekistan

⁴Frankfurt Institute for Advanced Studies, Frankfurt am Main, Germany

*e-mail: avdeyev@jinr.ru

The investigation of multiple emission of intermediate mass fragments (IMF) from a highly excited nuclear system give information on the possibility of the «liquid-gas» phase transition in nuclear media and hence basic knowledge of nuclear matter properties. This work studies the process of thermalization of the system at break-up in collisions of 2.1 GeV and 3.6 GeV protons with gold target. Beams of 2.1 GeV and 3.6 GeV protons were obtained from the Dubna superconducting accelerator NUCLOTRON. Intermediate-mass fragments spectra from target spectator were measured with the 4π setup FASA [1], [2], which contains thirty ΔE -E telescopes and 58 CsI(Tl) detectors covering 81% of 4π . To check whether this state of the emitting system is close to thermal equilibrium, the plot of the fragment invariant probability distribution in terms of the longitudinal-versus-transversal velocity components of IMF were studied. This analysis was performed for fragments with different charges. The source velocity decreases by a factor of three when going from lithium to carbon for a 2.1 GeV proton beam. Similar measurements performed for a 3.6 GeV proton beam showed that the source velocity is practically independent of the fragment charge. This behavior can be understood if «kinetic equilibrium» occurs prior to fragment emission for both 2.1 GeV and 3.6 GeV protons. But at the same time, «chemical equilibrium» is observed in the interaction $p(3.6 \text{ GeV}) + \text{Au}$, and is absent in the interaction $p(2.1 \text{ GeV}) + \text{Au}$.

References

1. S. P. Avdeyev [et al.], Nucl. Instrum. Methods. A **332**, 149 (1993).
2. V. V. Kirakosyan [et al.], Instrum. Exp. Tech. **51**, 159 (2008).

Influence of color string configurations on rapidity multiplicity correlations

E. V. Andronov*, M. D. Simonova

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: e.v.andronov@spbu.ru

To describe the soft processes in proton-proton collisions, careful modeling of the initial states is necessary. Within the framework of two-stage models of particle generation, particle sources are formed at the initial moment of impact, which are hadronized during further evolution. In the model with independent sources, the strongly intensive variables determined for the multiplicities of charged particles in separated pseudorapidity intervals are estimated. A comparison was made with the experimental data from the ALICE collaboration and a good agreement was found for certain values of the source parameters. In a model with several types of sources, it is shown that such variables lose the property of strong intensity due to the appearance of new types of sources. A new observable is proposed that is resistant to this effect.

The authors acknowledge Saint-Petersburg State University for a research project ID: 153212394.

Исследование выходов заряженных адронов в рамках гидродинамического моделирования с применением голографического уравнения состояния

А. В. Ануфриев*, В. Н. Коваленко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: anton.anufriev@spbu.ru

В начале XXI века была открыта новая фаза сильнодействующей материи, известная как кварк-глюонная плазма (КГП) [1]. Моделирование образования и эволюции КГП в релятивистских столкновениях тяжелых ионов, как правило, опирается на численное решение уравнений релятивистской гидродинамики с заданным уравнением состояния. Сложности, связанные с получением надежных результатов в решеточной КХД при конечных барионных плотностях (ненулевых барионных химических потенциалах), стимулируют развитие альтернативных теоретических подходов. В этом контексте в последние годы активно развиваются голографические модели, опирающиеся на AdS/CFT-соответствие. Они позволяют построить уравнение состояния КГП через анализ термодинамики черных бран в пространстве AdS^5 [2].

В настоящей работе предложен метод расширения голографической термодинамики за счет учета, помимо барионного химического потенциала, также химических потенциалов, соответствующих странности и электрическому заряду. Для этого используется феноменологический подход, опирающийся на термодинамические закономерности модели адронного газа. На основе термодинамических предсказаний, рассчитанных с помощью пакета Thermal-FIST [3], определена зависимость полного химического потенциала, обеспечивающая согласование результатов в характерном температурном диапазоне. Свободные параметры модели калибруются с помощью методов машинного обучения, решающих задачи регрессии и оптимизации, на основе результатов решеточной КХД для конститuentных масс кварков, приближенных к физическим значениям [4]. Разработанное голографическое уравнение состояния, учитывающее странность и электрический заряд, интегрировано в современные гидродинамические коды MUSIC [5] и vHLLE [6], что обеспечивает практическое применение разработанного подхода в моделировании столкновений тяжелых ионов.

Численное моделирование полного цикла эволюции, включая генерацию начальных условий, гидродинамическую стадию, фазу вымораживания и адронную постэволюцию, выполнено в рамках фреймворков iEBE-MUSIC и SMASH-vHLLE. С использованием описанного подхода вычислены адронные спектры заряженных π - и K-мезонов, а также протонов и их отношения в зависимости от энергии столкновения и поперечного импульса.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 153212394.

Список источников

1. J. Adams [et al.] (STAR Collab.), Nucl. Phys. A **757**, 102 (2005).
2. I. Aref'eva, K. Rannu, P. Slepov, J. High Energ. Phys. **90** (2021).
3. V. Vovchenko, H. Stoecker, Comput. Phys. Commun. A **244**, 295 (2019).
4. M. Cheng [et al.], Phys. Rev. D **77**, 014511 (2008).
5. B. Schenke, S. Jeon, C. Gale, Phys. Rev. C **82**, 014903 (2010).
6. Iu. Karpenko, P. Huovinen, M. Bleicher, Comput. Phys. Commun. **185**, 3016 (2014).

Применение классического глауберовского подхода к описанию дейтрон-дейтронного взаимодействия

С. Н. Белокурова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: s.belokurova@spbu.ru

Дейтрон-дейтронное взаимодействие исследовалось в рамках глауберовского подхода [1], [2] с учётом отличия от случая столкновений тяжелых ядер (в частности, симметричное расположение нуклонов относительно центра масс дейтрона). Получены оценки влияния свойств взаимодействия на нуклонных масштабах на флуктуации числа нуклонов-участников и числа нуклонных столкновений. Также разработан алгоритм монте-карловского (МК) моделирования процесса рассеяния дейтронов.

Были получены точные аналитические выражения для среднего значения и дисперсии числа раненых нуклонов, дисперсия общего числа нуклонов-участников, среднего значения и дисперсии числа нуклонных столкновений для dd взаимодействия при фиксированном значении прицельного параметра. Также были найдены выражения для вероятности двух последовательных столкновений нуклона из одного дейтрона с двумя нуклонами другого дейтрона и вероятности взаимодействия двух нуклонов одного дейтрона с двумя нуклонами другого при фиксированном значении прицельного параметра.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Список источников

1. A. Bialas, M. Bleszynski, W. Czyz, Nucl. Phys. B **111**, 461 (1976).
2. V. V. Vechernin, H. S. Nguyen, Phys. Rev. C **84**, 054909 (2011).

Investigation of nuclear deformation influence on anisotropic flows in heavy-ion collisions at NICA energies

N. Bikmetov^{1*}, P. Parfenov^{1,2}, A. Taranenko^{1,2}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

*e-mail: bikmetov@jinr.ru

For deformed nuclei, different orientations of the projectile and target lead to different overlap regions, participant eccentricities, spectator configurations and initial density profiles. In this work, we study the influence of nuclear deformation on the initial collision geometry, anisotropic flow, and correlations between flow harmonics at collision energies relevant to the MPD experiment at NICA [1]. The analysis is performed using model data from the JAM transport model [2] and the Monte Carlo Glauber model [3]. Different deformation configurations and mutual orientations of the colliding nuclei are considered to investigate their effects on the initial anisotropy of the system, charged-particle production, and collision geometry. For each configuration the directed (v_1), elliptic (v_2), and triangular (v_3) flow coefficients were measured. Furthermore, correlations between different flow harmonics are analyzed in order to estimate the sensitivity of collective observables to deformation of the colliding nuclei.

References

1. V. Abgaryan [et al. MPD Collaboration], Eur. Phys. J. A **58**, 140 (2022).
2. Y. Nara, A. Ohnishi, Phys. Rev. C **105**, 014911 (2022).
3. C. Loizides, J. Nagle, P. Steinberg, SoftwareX. **1–2**, 13 (2015).

**Analysis of charged and identified hadron spectra with Tsallis distributions
in O+O, Kr+Kr and Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6$ GeV using the UrQMD model**

A. P. Vasilieva

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

e-mail: anastasiyavasileva00@gmail.com

The transverse momentum (p_T) spectra of hadrons reflect the system properties at the freeze-out stage of relativistic heavy-ion collisions, providing insights into non-equilibrium dynamics and particle production mechanisms. In this work, we analyze the p_T spectra of charged and identified hadrons produced in O+O, Kr+Kr, and Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6$ GeV across different centrality classes. High-statistics event samples are generated using the Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics transport model. The non-extensive Tsallis distribution, widely used to describe particle production from soft to hard p_T regimes, is fitted to the p_T spectra. Several formulations of the Tsallis function are explored to compare their performance in describing the simulated data, and the centrality dependence of the extracted parameters is presented. This study serves as a methodological preparation for future experimental measurements within the ion-ion physics program of the Spin Physics Detector at the NICA collider.

Кумулятивные явления в области больших поперечных импульсов и их наблюдение в столкновениях ядер на коллайдере NICA

В. В. Вечернин*, С. В. Юрченко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.vechernin@spbu.ru

Рассмотрено рождение частиц с большими поперечными импульсами в ядро-ядерных столкновениях за пределами области кинематически разрешенной для pp столкновений [1–5]. Исследование рождения частиц в этой новой кумулятивной области позволит изучить процесс взаимодействия двух флутонов, который дает в этой области доминирующий вклад. Создание коллайдера NICA с умеренными энергиями сталкивающихся ядер и высокой светимостью открывает возможность экспериментального изучения этого явления на установках MPD и SPD, что невозможно при сверхвысоких энергиях RHIC и LHC. Для теоретического описания этого нового явления микроскопический кварковый подход [6–8], разработанный ранее для описания образования кумулятивных частиц в протон-ядерных взаимодействиях в области фрагментации ядра и учитывающий только взаимодействие нуклона с флутоном, обобщен на случай взаимодействия двух флутонов при столкновении ядер. На его основе проведен анализ процесса рождения пионов и протонов в AA-столкновениях в новой кумулятивной области. Исследовано поведение фейнмановских диаграмм вблизи кинематических порогов и рассчитано асимптотическое поведение сечений рождения частиц вблизи кинематической границы реакции. Сформулированы новые правила кваркового счета для инклюзивных сечений в области центральных быстрот и больших поперечных импульсов [3–5]. Проверено [3, 4], что разработанный микроскопический подход при его применении для описания упругих и квазиупругих процессов с большой передачей импульса правильно воспроизводит полученные ранее правила кваркового счета для этих процессов [9–11]. Показано, что для случая рождения протонов, в отличие от пионов, вблизи кинематической границы реакции доминирует вклад когерентной коалесценции трех кварков, рожденных в разных точках [5], подобно тому, как это было в области фрагментации [8], что приводит к нарушению стандартных правил кваркового счета и необходимости их модификации. Рассмотрено включение дикварков [12] в предлагаемую схему. Разработанный подход и полученные нами новые правила кваркового счета для инклюзивных сечений рождения пионов и протонов могут быть проверены в экспериментах MPD и SPD на коллайдере NICA.

Работа поддержана грантом СПбГУ ID:156294180.

Список источников

1. V. Vechernin, S. Belokurova, S. Yurchenko, Symmetry. **16**, 79 (2024).
2. V. V. Vechernin, S. N. Belokurova, S. V. Yurchenko, Phys. Part. Nuclei. **55**, 889 (2024).
3. V. Vechernin, S. Yurchenko, Int. J. Mod. Phys. E **33**, 2441022 (2024).
4. S. Yurchenko, V. Vechernin, Phys. Atom. Nucl. **88**, 349 (2025).
5. V. Vechernin, S. Yurchenko, Phys. Part. Nuclei. **57** (5) (2026) [in press].
6. M. A. Braun, V. V. Vechernin, Nucl. Phys. B **427**, 614 (1994).
7. M. A. Braun, V. V. Vechernin, Theor. Math. Phys. **139**, 766 (2004).
8. V. V. Vechernin, AIP Conf. Proc. **1707**, 060020 (2016).
9. V. A. Matveev, R. M. Muradyan, A. N. Tavkhelidze. Nuovo Cimento Lett. **7**, 719 (1973).
10. S. J. Brodsky, B. T. Chertok, Phys. Rev. D **14**, 3003 (1976).
11. Yu. N. Uzikov JETP Lett. **81**, 303 (2005).
12. V. T. Kim, Mod. Phys. Lett. A **3**, 909 (1988).

Исследование нейросетевых подходов к оценке прицельного параметра в столкновениях тяжелых ионов на основе 4π информации о событии

К. А. Галактионов*, В. А. Руднев, Ф. Ф. Валиев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: kirill.galaktionov@spbu.ru

В работе исследуются подходы к оценке прицельного параметра столкновений тяжелых ионов по модельным данным, полученным с использованием генераторов QGSM [1], EPOS [2] и RHQMD [3], на основе информации о зарегистрированных вторичных частицах. Одной из основных проблем подобных алгоритмов является зависимость качества восстановления параметров события от используемой модели генерации данных.

В рамках работы изучается устойчивость алгоритмов при использовании различных представлений полной (4π) информации о событии, рассматриваемой как промежуточный этап исследований. Анализировались подходы, основанные как на использовании отдельных физических наблюдаемых, включая множественность частиц, характеристики forward-backward асимметрии и параметры времен пролета, так и на обработке более полной детекторной информации.

Сравнение различных наборов признаков и способов представления данных показало, что комбинирование нескольких физических наблюдаемых позволяет повысить устойчивость оценки прицельного параметра к различиям между моделями генерации событий. Дополнительно рассматривается применение методов domain adaptation и deep reconstruction neural networks (DRNN) [4].

Полученные результаты указывают на возможность построения алгоритмов оценки прицельного параметра более устойчивых к модельным данным при использовании полной (4π) информации о событии. Рассматриваемый подход может служить основой для разработки двухэтапной схемы восстановления параметров столкновения, в которой на промежуточном этапе по данным отдельного детектора с ограниченным акцептансом восстанавливаются наблюдаемые характеристики всего события, допускающие прямое сопоставление с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 153212394.

Список источников

1. N. S. Amelin, K. K. Gudima, V. D. Toneev *Sov. J. Nucl. Phys.* **51**, 1730 (1990).
2. K. Werner, F.-M. Liu, T. Pierog, *Phys. Rev. C* **74**, 044902 (2006).
3. J. Aichelin [et al.], *Phys. Rev. C* **101**, 065203 (2020).
4. M. Wang, W. Deng, *Neurocomputing*. **312**, 135 (2018).

Экранирование заряда в многокомпонентной абелевой модели Хиггса

Н. В. Герасименюк^{1*}, М. Н. Чернодуб^{2,3}, В. А. Гой^{1,4}, А. В. Молочков^{1,3,5}

¹Тихоокеанский квантовый центр

Дальневосточного федерального университета, Владивосток, Россия

²Институт Дени Пуассона, Университет Тура, Университет Орлеана, Тур, Франция

³Западный университет Тимишоары, Тимишоара, Румыния

⁴Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

⁵Пекинский институт математических наук и приложений, Университет Цинхуа, Пекин, Китай

*e-mail: gerasimenyuk.nv@dvfu.ru

К 1970-м годам в результате долгих исследований сформировалось четкое представление о механизмах экранирования пробного источника в квантовой электродинамике. Вакуум в квантовой теории поля – это не пустота в классическом смысле, а непрерывный процесс рождения и уничтожения виртуальных частиц. Текущая картина предполагает, что при внесении внешнего источника происходит поляризация вакуума, которая приводит к нейтрализации воздействия этого источника на больших расстояниях. Однако многие детали этого процесса до сих пор не ясны.

В настоящее время есть ряд исследований, посвященных вопросам экранирования целочисленных зарядов [1,2], кратных заряду электрона, и дробных [3]. Абелева модель Хиггса в таких исследованиях удобна тем, что позволяет сформировать общее понимание эффектов экранирования, которые в дальнейшем переносятся на реальную КХД, где свойства вакуума несут ключевую роль.

Наше исследование предполагает анализ ситуации, в которых участвуют два комплексных поля, каждое из которых несет свой собственный заряд. Такая особенность может привести к возникновению эффектов, связанных с комбинированием частиц разного сорта. В работе были рассмотрены два случая зарядов: рациональные и иррациональные. Для описания различных особенностей экранирования мы строим потенциал взаимодействия между парой пробных частиц и исследуем его поведение для разных случаев. В результате мы видим, что для иррациональных зарядов экранирование пробного источника имеет несколько режимов, чего не наблюдается для дробных. Представленные исследования проводились в рамках решеточной регуляризации квантовой теории поля, где для вычисления основных наблюдаемых используется гибридный метод Монте-Карло.

В работе были задействованы ресурсы вычислительного кластера Дальневосточного федерального университета «Восток-1» и центра коллективного пользования «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН. Работа поддержана грантом № FZNS-2024-0002 Министерства науки и высшего образования России.

Список источников

1. H. Ishihara, T. Ogawa, arXiv:1811.10848 [hep-th] (2020).
2. P. Forgács, Á. Lukács, Eur. Phys. J. C **81**(3), 243 (2021).
3. D. Diakonov, K. Zarembo, J. High Energy Phys. JHEP. **12**, 014 (1998).

Неравновесный квантовый гидродинамический подход и эмиссия фрагментов в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий

А. Т. Дьяченко^{1,2,*}, И. А. Митропольский¹, А. П. Черняев³

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: dyachenko_a@mail.ru

Эмиссия фрагментов при столкновении протонов и тяжелых ионов на ускорителях важна для понимания фазовой КХД диаграммы и имеет широкое применение в технике [1], а также в ядерной медицине на медицинских ускорителях [2]. Здесь на основе эффективного уравнения Клейна –Фока-Гордона [3] и уравнения Шредингера [4] рассмотрено развитие неравновесного квантового гидродинамического подхода при описании испускания кумулятивных протонов и фрагментов (p, d, t) в столкновениях тяжелых ионов при энергиях ускорителя У-70 (ИФВЭ, Протвино) [5], ИТЭФ (Москва) [6], [7] и BM@N коллаборации (ОИЯИ, Дубна) [5]. Показано преимущество данного подхода в описании экспериментальных данных ИФВЭ и ИТЭФ для эмиссии протонов и фрагментов H, ²H, ³H, ³He, ⁴He, ⁶Li, ⁷Li по сравнению с другими теоретическими моделями.

Получено объяснение эффекта расщепления в импульсных спектрах протонов и легких фрагментов в реакции (230 МэВ/А)⁵⁶Fe+⁹Be→f+X в эксперименте ФРАГМ (ИТЭФ) [8]. В описании этих данных было учтено изменение импульсного распределения нуклонов в зависимости от среднего ядерного потенциала с расстоянием, а также включен механизм коалесценции по теории Лифшица-Слезова. Расщепление спектра пропадает с увеличением энергии столкновения ионов и при переходе к более тяжелым фрагментам

Мы можем успешно описать в нашем подходе двойные дифференциальные распределения по поперечному импульсу и быстрой протонов, дейтронов и тритонов в столкновениях ядер аргона на фиксированной мишени с различными ядрами при энергии 3.2 ГэВ на нуклон в эксперименте BM@N коллаборации [9] наряду с пионами и каонами для столкновения ионов ⁴⁰Ar с различными ядрами при энергии 3,2 ГэВ на нуклон из работы [10] При описании имеющихся экспериментальных данных существенно выделение образующегося hot spot, который получил развитие в последнее время в физике элементарных частиц [11].

Список источников

1. G. N. Flerov, V. S. Barashenkov, Sov. Phys. Usp. **17**, 783 (1975).
2. А. П. Черняев, ЭЧАЯ. **43**,500 (2012).
3. A.T. D'yachenko, Phys. At. Nucl. **87**, 646 (2024).
4. A.T. D'yachenko, I. A. Mitropolsky, Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. **88**, 1279 (2024).
5. A.T. D'yachenko, Phys. Part. Nucl. **57**, 365 (2026).
6. A.T. D'yachenko, I. A. Mitropolsky, Phys. At. Nucl. **85**, 1053 (2022).
7. A.T. D'yachenko, Phys. At. Nucl. **88**, 805 (2025).
8. B.M. Abramov [et al.], EPJ Web of Conferences. **204**, 03008 (2019).
9. S. Afanasiev [et al.], BM@N Collaboration, arXiv:2504.02759v1.
10. S. Afanasiev [et al.], BM@N Collaboration, JHEP. **07**, 174 (2023)4 [hep-ex/2303.16243].
11. R. Blok, R. Segev, M. Strikman, Eur. Phys. J. C **83**, 415 (2023).

Моделирование кумулятивных эффектов в столкновениях тяжелых ионов при энергиях коллайдера NICA

М. А. Жаров*, К. В. Размыслов, В. В. Монахов, Ф. Ф. Валиев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: m.zharov@spbu.ru

В настоящее время идет планирование экспериментов по столкновению ядер тяжелых ионов на детекторе MPD коллайдера NICA [1]. В таких экспериментах представляют интерес кумулятивные режимы столкновений ядра с ядром, поскольку они чувствительны к локальным нуклон-нуклонным корреляциям и высокоимпульсным компонентам ядерной волновой функции [2], [3]. В энергетическом диапазоне NICA подпороговое и околопороговое рождение нуклонов чувствительно к локальным нуклон-нуклонным корреляциям и высокоимпульсным компонентам ядерной волновой функции [4].

При исследовании кумулятивных и подпороговых процессов с помощью генераторов событий следует обращать особое внимание на соблюдение в генерируемых событиях законов сохранения энергии (E), а также электрического (Q) и барионного (B) зарядов [5, 6]. В противном случае наблюдаемые эффекты могут являться следствием некорректной работы генераторов событий. Мы обнаружили, что в EPOS4 наблюдаются существенные нарушения законов сохранения E, Q, B. В RHQMD при энергии NICA также наблюдалось существенное нарушение закона сохранения энергии, причем величина этого нарушения оказалась сильно зависящей от прицельного параметра. В связи с этим мы отказались от использования EPOS4 и RHQMD для изучения кумулятивных и подпороговых эффектов. В данной работе предлагается модификация транспортной модели UrQMD, позволяющая использовать её для расчётов кумулятивных эффектов за счёт явного учёта компактных двухнуклонных конфигураций.

Мы модифицировали исходный код UrQMD4 таким образом, что часть пар протонов в исходных ядрах заменяется на компактные двухнуклонные pp-конфигурации (флутоны F) с барионным числом $B=2$ и отдельным классом столкновений с нуклонами $F+N \rightarrow N+N+N$. Такая схема позволяет в рамках одной и той же транспортной модели сравнивать расчёты со стандартным описанием ядра и с явным учётом компактных двухнуклонных конфигураций. Отдельно рассматривается влияние флутонов на подпороговое и околопороговое рождение антибарионов в диапазоне энергий NICA.

В текущей реализации рассматриваются только компактные двухнуклонные конфигурации. В дальнейшем предполагается расширить модель за счёт включения многонуклонных кластеров и, при необходимости, дополнительных классов столкновений. Также планируется использование такого описания в более детальных расчётах для эксперимента MPD, включая сопоставление с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ ID 153212394.

Список источников

1. P. Parfenov [et al.], Phys. At. Nucl. **88**(4), 715 (2025).
2. M. Braun, V. Vechernin, Nucl. Phys. B **427**, 614 (1994).
3. M. A. Braun, V. V. Vechernin, Phys. At. Nucl. **60**(3), 432 (1997).
4. В. В. Вечернин [и др.], ЭЧАЯ **55**(4), 1020 (2024).
5. К. В. Размыслов [и др.], Известия РАН Сер. физическая. **89**(8), 1334 (2025).
6. К. В. Размыслов [и др.], ЭЧАЯ. **57**(3), (2026).

Ядро ^8Be и состояние Хойла в диссоциации релятивистских ядер

Д. А. Артеменков, А. А. Зайцев*, П. И. Зарубин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: zaicev@jinr.ru

В докладе представлены ключевые результаты и обобщения эксперимента БЕККЕРЕЛЬ в ОИЯИ, полученные в исследовании нестабильных ядерных состояний в релятивистской диссоциации широкого разнообразия ядер [1]. Продуктивность данного метода обеспечивается рекордно высоким пространственным разрешением и возможностью детектирования всех без исключения фрагментов ядерных взаимодействий. Согласно инвариантным массам, вычисленным на основе данных точных измерений углов испускания в предельно узком конусе фрагментации, к настоящему времени идентифицированы вклады распадов $^8\text{Be}(0^+)$, $^8\text{Be}(2^+)$, $^9\text{Be}(1.7)$, ^9Be , ^6Be , $^{12}\text{C}(0^{+}_2)$ или состояние Хойла и $^{12}\text{C}(3^-)$ [2]. Установлен рост вклада $^8\text{Be}(0^+)$ с ростом множественности сопровождающих α -частиц, которому следует ^9Be и $^{12}\text{C}(0^{+}_2)$ [3]. Структура этих состояний и разнообразие родительских ядер при отсутствии влияния начальной энергии позволяет предположить слияние α -частиц и нуклонов, возникающих в диссоциации. Начальная плотность и длительность вторичного взаимодействия последних могут быть достаточны вплоть до протекания наиболее низкоэнергетических реакций синтеза. Такой сценарий нуждается в привлечении представлений физики низких энергий в интерпретацию релятивистской фрагментации. Внедрение автоматизированной микроскопии [4] для анализа облучений в пучках ускорительного комплекса ОИЯИ NICA создает современную основу применения метода ядерной эмульсии, ставшего основополагающим в физике микромира. Возможность регистрации в ядерной эмульсии событий фрагментации релятивистских ядер, обнаруженная еще в пионерскую эпоху физики космических лучей, открывает перспективу применения этого метода для изучения предельно холодных ансамблей ядер Н и Не в интересах развития физики ядерной кластеризации и, возможно, расширения сценариев ядерной астрофизики.

Список источников

1. D. A. Artemenkov, A. A. Zaitsev, P. I. Zarubin, *Natural Sci. Rev.* **3**, 200603 (2026).
2. P. I. Zarubin, *Lecture Notes in Physics* 875 *Clusters in Nuclei*. **3**, 51 (2013).
3. A. A. Zaitsev [et al.], *Phys. Lett. B* **820**, 136460 (2021).
4. A. A. Zaitsev [et al.], *Phys. Part. Nuclei*. **56**, 881 (2025).

Measurement of double differential inclusive cross sections of forward neutron emission in the BM@N experiment

A. A. Zubankov^{1,2} (on behalf of BM@N collaboration)

¹Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

e-mail: zubankov@inr.ru

A Highly Granular time-of-flight Neutron Detector (HGND) is currently under development to measure neutron yields and flow in the kinetic energy range of 0.3–4 GeV [1] in nucleus-nucleus collisions at the BM@N experiment. To validate the concept of the full-scale HGND, a compact HGND prototype was tested in collisions of 3.8A GeV 124Xe with a CsI target in this experiment. The HGND prototype was placed at 0 degrees relative the undeflected beam axis to measure yields of spectator neutrons from hadronic interactions of nuclei and neutron yields from electromagnetic dissociation (EMD) of projectile nuclei [2].

The neutron kinetic energy spectra reconstructed by the time-of-flight method are compared with the Geant4 modelling in the complete geometry of the BM@N setup using the DCM-QGSM-SMM and UrQMD-AMC models as heavy-ion collision generators and using the RELDIS model as an EMD event generator. The detector provides high neutron detection efficiency, but the resolution of energy measurement for such high-energy neutrons is restricted due to the limited time resolution of about 270 ps. In order to restore the true neutron kinetic energy spectrum from the distorted reconstructed spectrum, an unfolding procedure was used [3]. This approach allows the measurement of double-differential inclusive cross sections of forward neutron emission as a function of rapidity and solid angle even with limited time resolution. To validate the approach, the measurements of neutrons from EMD were performed, as these neutrons are characterized by a very narrow energy distribution centered around the projectile beam energy [4].

The measured double differential inclusive cross sections of forward neutron emission in collisions of 3.8A GeV 124Xe with a CsI target are compared with those obtained by the ALADIN collaboration in collisions of 600A MeV 124Sn and 124La with a 124Sn target taking into account the difference in acceptance between two experiments. Despite the significant difference in energy, a weak dependence on beam energy is observed, as suggested by the concept of limiting fragmentation [5]. The described approach can be successfully applied also to the full-scale HGND, which is expected to have a significantly better time resolution of about 150 ps to measure neutron energies in the midrapidity region.

Список источников

1. S. Morozov [et al.], Nucl. Instrum. Meth. A **1072**, 170152 (2025).
2. A. Zubankov [et al.], Nucl. Sci. Tech. **36**, 226 (2025).
3. L. Brenner [et al.], Int. J. Mod. Phys. A, **35** (24), 2050145 (2020).
4. I. A. Pshenichnov [et al.], Int. J. Mod. Phys. E **33**, 2441007 (2024).
5. J. Benecke [et al.], Phys. Rev., **188** (5), 2159 (1969).

Особенности измерения свойств резонансов в эксперименте MPD в $\text{Xe}+\text{W}$ столкновениях при энергии 2,5 А*ГэВ

Я. А. Бердников^{1,2}, Д. А. Иванищев^{1,2*}, Д. О. Котов^{1,2}, М. В. Малаев^{1,2}, Ю. Г. Рябов¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: ivanishchev_da@pnpi.nrcki.ru

Исследование ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых релятивистских ядер, является одной из актуальных задач в физике высоких энергий [1]. Помимо кварк-глюонной плазмы, образующейся в таких сталкивающихся системах, особый интерес представляет последняя стадия столкновения – адронная фаза. Изучение рождения резонансов в столкновениях релятивистских тяжелых ядер является основным инструментом для анализа адронной фазы [2]. Короткое время жизни резонансов делает их индикаторами динамического равновесия между процессами перерасеяния и регенерации. Кроме того, их рождение позволяет исследовать широкий спектр физических эффектов, таких как возможное восстановление киральной симметрии, образование странности, избыточный выход барионов при промежуточных поперечных импульсах, зависимость потерь энергии партонов от аромата при высоком импульсе и др. В настоящее время наиболее интересная часть фазовой диаграммы квантовохромодинамической материи, где ожидается обнаружение критической точки и фазового перехода первого рода, лежит в области высоких остаточных барионных плотностей и умеренных температур (при энергии столкновения ядер $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2\text{--}15$ ГэВ) [3]. Именно на исследование этой области и нацелен строящийся в ОИЯИ (г. Дубна) Сверхпроводящий коллайдер протонов и тяжелых ионов NICA и эксперимент с многофункциональным детектором MPD по изучению ядерной среды, образующейся в столкновениях тяжелых релятивистских ядер при малых температурах и больших остаточных барионных плотностях [3]. Согласно текущим планам одними из первых столкновений на ускорителе NICA будут столкновения ядер ксенона Xe с неподвижной мишенью из вольфрама W при кинетической энергии налетающего пучка $E_{\text{kin}} = 2,5\text{A}$ ГэВ.

В настоящей работе исследован потенциал установки MPD в режиме с фиксированной мишенью измерения характеристик мезонных резонансов. Исследование проводилось для столкновений $\text{Xe}+\text{W}$ при энергии 2,5 ГэВ*нуклон. Поскольку установка MPD находится на этапе подготовки к запуску, все процессы – от первичного столкновения ядер до формирования сигналов в детекторах – были воспроизведены с помощью Монте-Карло моделирования. По результатам работы определены достижимые для физического анализа области быстроты, поперечного импульса и центральности событий.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

Список источников

1. Я. А. Бердников [и др.], НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки. **18**(4), 177 (2025).
2. Я. А. Бердников [и др.], НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки. **18**(2), 119 (2025).
3. R. Abdulin [et. al. MPD Collaboration]. Revista Mexicana de Física. **71**(4), 041201 (2025).

Методы определения центральности с использованием передних детекторов в эксперименте BM@N

Д. М. Идрисов*, Ф. Ф. Губер

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: idrisov.dim@mail.ru

Определение центральности в столкновениях тяжёлых ионов является фундаментальной задачей, поскольку позволяет связать измеряемые в эксперименте величины с прицельным параметром [1]. Надёжное установление центральности необходимо для сопоставления данных, полученных в разных экспериментах, и для проверки теоретических моделей при изучении фазовой диаграммы квантовой хромодинамики. Классический подход, основанный на измерении множественности заряженных частиц и модели Глаубера, при энергиях пучка порядка нескольких ГэВ на нуклон сталкивается с рядом трудностей. К ним относятся заметный вклад кулоновского взаимодействия, эффекты остановки барионов [2], а также низкая и дискретная множественность рождённых частиц, которая приводит к значительным статистическим флуктуациям [3]. Это делает затруднительным разделение событий на узкие классы центральности и усложняет отделение объёмных флуктуаций (связанных с геометрией столкновения) от динамических, что критически важно для событийных анализов флуктуаций множественности протонов или заряженных частиц.

В настоящей работе предложен байесовский подход к определению центральности. Разработана модификация одномерного метода, позволяющая учитывать эффективность триггерной системы и восстанавливать зависимость эффективности регистрации событий от прицельного параметра. Представлено обобщение метода на двумерный случай, в котором одновременно используются две наблюдаемые: число и энергия спектаторов, зарегистрированная в FHCAL. Преимуществами двумерного подхода являются корректная работа с немонотонным откликом детектора, более чёткое разделение центральных событий и подавление автокорреляционных эффектов.

Разработанные методы применены к экспериментальным данным первого физического сеанса BM@N для реакции Xe+CsI при энергии пучка 3,8 А ГэВ. Построенное двумерное распределение хорошо описывает экспериментальные данные. На его основе с помощью метода k-средних всё распределение разделено на 10 классов центральности. Сравнение с классическим методом Монте-Карло Глаубера показывает, что средний прицельный параметр в каждом классе согласуется в пределах 5% для всех рассмотренных подходов, включая вариант, использующий только сигналы передних детекторов (кварцевый годоскоп и FHCAL). Восстановленная из данных зависимость эффективности регистрации от прицельного параметра согласуется с прямыми измерениями по триггеру минимального смещения (МВТ). Полученные результаты подтверждают надёжность и взаимную согласованность предложенных методов, которые могут быть использованы для обработки данных в эксперименте BM@N, а также в других экспериментах по столкновению тяжёлых ионов при промежуточных энергиях.

Список источников

1. W. Broniowski, W. Florkowski, Phys. Rev. C **65**, 024905 (2002).
2. S. V. Simak, G. A. Feofilov, Phys. Part. Nuclei. **56**, 877 (2025).
3. X. Luo [et al.], J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **40**, 105104 (2013).

Моделирование влияния деформации ядер на азимутальную анизотропию частиц в генераторе событий HYDJET++

И. П. Лохтин¹, Д. А. Мягков^{1,2*}, С. В. Петрушанко¹, А. М. Снигирев¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: danila.myagkov.msu@mail.ru

Монте-Карло модель HYDJET++ является одним из широко используемых генераторов событий для моделирования ядро-ядерных столкновений при энергиях коллайдеров RHIC и LHC. В его основе лежит представление полного события как суперпозиции мягкой гидродинамической компоненты и жесткой компоненты, связанной с фрагментацией партонов и потерями энергии в плотной среде [1]. Такая структура делает HYDJET++ удобной платформой для изучения как коллективных эффектов, так и эффекта гашения струй [2], [3].

В данной работе представлена модификация HYDJET++, направленная на включение деформированной ядерной геометрии в описание начального состояния столкновения. Мотивацией для такой модификации служат экспериментальные результаты по азимутальной анизотропии частиц в Xe–Xe столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ на пару нуклонов в с.ц.м., для объяснения которых предлагался учет особенностей ядерной геометрии деформированных ядер. Измеренные коэффициенты азимутальной анизотропии демонстрируют чувствительность к размеру системы, начальным эксцентриситетам и деформации ядер ксенона [4,5]. В обновленной версии генератора событий HYDJET++ сферическое приближение для распределения плотности ядра обобщено на случай деформированного распределения Вудса–Саксона. Ориентация каждого из сталкивающихся ядер задается с помощью пространственных углов, что позволяет рассматривать как фиксированные конфигурации типа tip–tip, body–body и tip–body, так и усреднение по случайным ориентациям.

Основное внимание в представленных расчетах уделено геометрическим характеристикам начального состояния, непосредственно связанным с формированием азимутальной анизотропии. Для различных центральностей и ориентаций деформированных ядер были вычислены геометрические эксцентриситеты, прежде всего ϵ_2 , определяющий доминирующий вклад в эллиптический поток. На этой основе может быть получена первая оценка v_2 в приближении линейного отклика среды, $v_2 \simeq k_2 \epsilon_2$. Такой подход позволяет отделить чисто геометрический вклад деформации ядра от других эффектов (например, связанных с флуктуациями начального состояния или партонными распределениями) и использовать его как первый контрольный уровень перед полным событийным моделированием в HYDJET++.

Первые полученные результаты показывают, что учет деформации приводит к заметной ориентационной зависимости начального эксцентриситета. Особенно важным этот эффект оказывается для центральных и близких к центральным столкновений, где вклад деформации ядра может быть сопоставим с вкладом флуктуаций начального состояния. В сферическом пределе модифицированный геометрический блок воспроизводит базовую схему расчета, что позволяет рассматривать новую реализацию как расширение стандартной версии модели HYDJET++ без нарушения его предельного случая.

Список источников

1. I. P. Lokhtin, L. V. Malinina, S. V. Petrushanko, [et al.], Comput. Phys. Commun. **180**(5), 779 (2009).
2. D. A. Myagkov, S. V. Petrushanko Mosc. Univ. Phys. Bull. **80**(2) S835 (2025)
3. D. A. Myagkov, S. V. Petrushanko Phys. At. Nucl. **88**(4), 705 (2025).
4. The CMS Collaboration, Phys. Rev. C **100**, 044902 (2019).
5. The CMS Collaboration, Phys. Lett. B, **876**, 140359 (2026).

Overview of the star hot QCD results

E. Nedorezov (STAR collaboration)

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: nedorezov@jinr.ru

In 2026, the STAR experiment at the Relativistic Heavy Ion Collider completed its final data-taking period. Over its years of operation, STAR collected a comprehensive data set for studying strongly interacting matter under extreme conditions. A large amount of these data remains under analysis, so the STAR physics program will continue to provide important results in the coming years.

A central part of the STAR hot QCD program is the second phase of the Beam Energy Scan, BES-II, which explores the QCD phase diagram in the region of high baryon density using Au+Au collisions at center-of-mass energies of $\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}27$ GeV in collider and fixed-target modes. With major detector upgrades that significantly improved STAR's tracking and particle identification capabilities, together with high-statistics data samples, BES-II enables more precise studies of the transition between hadronic matter and the quark-gluon plasma, as well as the search for possible signatures of the QCD critical point.

In this talk, recent STAR results from the hot QCD program will be reviewed. The discussion will include selected BES-II measurements related to particle production, collective phenomena, anisotropic flow, correlations, hypernuclei, global polarization, spin alignment, and net-proton higher-order moments. The overview will also include recent results from O+O and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, including measurements of jet quenching and dilepton production. Together, these measurements provide constraints on the properties of hot and dense QCD matter over a broad range of collision energies, baryon chemical potentials, and collision systems, as well as on the structure of the QCD phase diagram.

Λ d correlation function in Xe+CsI collisions AT 3.8 AGeV in the BM@N experiment

V. A. Plotnikov (for the BM@N collaboration)

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: vplotnikov@jinr.ru

Femtoscopic correlations of hyperons with nucleons and light fragments provide information on the two- and three-particle forces hardly accessible otherwise. This information is important to understand the equation of state of the ultradense matter formed in heavy-ion collisions and present in the interior of neutron stars. It can be also useful for understanding the properties of the light hypernuclei, such as hypertriton. The first results of the BM@N experiment on the femtoscopic Λ d correlations in Xe+CsI collisions at the kinetic beam energy of 3.8 AGeV are given.

Heavy-flavor jet quenching in pre-equilibrium medium

D. Prokhorova*, S. Shi, E. Andronov

Tsinghua University, Beijing, China

*e-mail: daria-prokhorova@mail.tsinghua.edu.cn

Recent observation of collective phenomena in small colliding systems challenged conventional criteria for Quark-Gluon Plasma (QGP) formation and underscored the need for transport approaches capable of describing far-from-equilibrium dynamics. In this work, we employ heavy-flavor (HF) jet tomography to probe the short-lived medium created in proton-proton collisions at LHC energies. On an event-by-event basis, HF quark pairs produced in hard scattering via PYTHIA are embedded into a color string model and interact with the surrounding medium constituents through both elastic and inelastic collisions. By analyzing the momentum modifications of charm and bottom quarks, we find that momentum damping strongly depends on the degree of medium isotropization and is dominated by the radiative energy-loss mechanism. The resulting final-state HF hadron spectra are contrasted with predictions from equilibrated QGP models such as EPOS4HQ.

О применении генераторов EPOS4, UrQMD, PHQMD и PYTHIA для анализа событий в физике сверхвысоких энергий

К. В. Размыслов*, М. А. Жаров, Ф. Ф. Валиев, В. М. Монахов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: st097914@student.spbu.ru

Для анализа экспериментов в области высоких энергий на LHC и NICA требуется сравнение с результатами теоретического моделирования, обычно проводимого в настоящее время с помощью генераторов событий EPOS4.0.0 [1], UrQMD 4 [2], PHQMD [3] или Pythia 8 [4]. Корректное моделирование должно обеспечивать выполнение законов сохранения энергии, электрического, барионного и лептонного зарядов [5,6].

Нами предложено изучение подпорогового рождения антипротонов в экспериментах MPD NICA в качестве инструмента, чувствительного к выбору моделей взаимодействий при столкновениях ядер тяжелых ионов. В частности, для изучения влияния флуктуаций и других кумулятивных эффектов. Использование генераторов, в которых нарушаются законы сохранения, делает невозможным корректный анализ таких процессов.

В работе проведена проверка выполнения законов сохранения энергии, электрического, барионного и лептонного зарядов при моделировании столкновений ксенон-вольфрам при энергиях эксперимента MPD коллайдера NICA.

Выявлено наличие особенностей поведения PHQMD, способных приводить к значительному ухудшению выполнения закона сохранения энергии. Показано, что выполнение закона сохранения при моделировании в PHQMD зависит от прицельного параметра, что ограничивает возможное применение данного генератора.

Оценены нарушения законов сохранения зарядов и энергии в других генераторах событий и изучена возможность фильтрации (отбрасывания) событий, нарушающих законы сохранения. Показано влияние нарушения законов сохранения на возможный анализ моделирования событий столкновений на NICA.

Проведено моделирование рождения антипротонов при столкновении ядер ксенона и вольфрама при энергиях NICA в областях, примыкающих к порогу рождения антипротонов. Построены зависимости числа рождающихся частиц и их угловых распределений от энергии.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Список источников

1. K. Werner. Phys.Rev. C **108**, 064903 (2023).
2. S. A. Bass [et al.] Progress in Part. Nucl. Phys. **41**, 225 (1998).
3. J. Aichelin [et al.] Phys.Rev. C **101**, 044905 (2020).
4. C. Bierlich [et al.], SciPost Phys.Codeb. **008** (2022).
5. К. В. Размыслов [и др.], Изв. РАН Сер. физическая. **89** (8) 1334 (2025).
6. К. В. Размыслов [и др.], ЭЧАЯ. **57**(3) (2026).

Pauli equation in spaces of constant curvature and extended Nikiforov-Uvarov method

Abdaljalel E. Alizzi^{1,3}, Zurab K. Silagadze^{1,2*}

¹Nvosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

²Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

³Al Furat University, Deir ez-Zor, Syrian Arab Republic

*e-mail: Z.K.Silagadze@inp.nsk.su

The Nikiforov-Uvarov method [1] is a popular and useful tool for the analysis of second-order differential equations of generalized hypergeometric type in some problems of quantum and classical physics. In the previous publication [2], we applied the Nikiforov-Uvarov method to a non-relativistic spinless Schrödinger particle bound by a Coulomb potential in spaces of constant curvature. A natural next step is to include spin and consider the non-relativistic Pauli equation in the same situation. However, in this case, we obtain a Heun equation with four singularities, and the Nikiforov-Uvarov method in its usual form is inapplicable.

Extension of Nikiforov-Uvarov method for the solution of Heun equation was considered in [3]. We apply the extended Nikiforov-Uvarov method to the non-relativistic limit of the Dirac equation with a Coulomb potential in spaces of constant curvature. In this case, the radial equation reduces to the Heun equation, and the extended Nikiforov-Uvarov method easily yields a quantization condition which leads to necessary condition under which the resulting Heun equation can have polynomial solutions. The energy spectrum implied by the quantization condition is virtually identical to the spectrum of a spinless particle obtained using the Schrödinger equation, except for the absence of the “geometric potential”, confirming the non-commutativity of the naive nonrelativistic limit with the “squaring” of the Dirac equation, first discovered on curved surfaces.

However, other necessary conditions for the existence of polynomial solutions cannot be met, and this fact undermines the reliability of the results obtained. This circumstance forces us to conclude that the extended Nikiforov-Uvarov method has limited, if any, value when considering similar problems in quantum mechanics, confirming the critical conclusion about this method given in [4].

References

1. A. Nikiforov, V. Uvarov, *Special Functions of Mathematical Physics: A Unified Introduction with Applications*, Springer, Basel, 1988.
2. A. E. Alizzi, A. E. Sagaydak, Z. K. Silagadze, *Ann. Phys.* **479**, 170066 (2025).
3. H. Karayer, D. Demirhan, F. Büyükkılıç, *J. Math. Phys.* **56**, 063504 (2015)
4. F. M. Fernández, *J. Math. Phys.* **59**, 053501 (2018), *J. Math. Phys.* **67**, 024101 (2026).

Dibaryon $d^*(2380)$: prediction, detection, understanding

T. Yu. Skorod'ko

Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

e-mail: tatiskor@mail.ru

In 1964 Dyson and Xuong predicted the existence of a non-strange dibaryon with a mass of 2350 MeV and quantum numbers $I(J^\pi) = 0(3^+)$. More than forty years later, a dibaryon with these quantum numbers and a mass of 2380 MeV was discovered by the WASA-at-COSY collaboration in the $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$ channel. It got the name $d^*(2380)$. In subsequent experiments d^* was detected in all quasi-free np interactions that produced two pions in the final state. A contribution from $d^*(2380)$ was also detected in a partial-wave analysis of the elastic scattering of polarized neutrons on protons. Initially, the decay of d^* was satisfactorily described through the intermediate $\Delta\Delta$ state. Nevertheless, the possibility of d^* decaying to $D_{12}\pi$ system is being discussed. The latter is particularly interesting in the context of Kukulin's hypothesis that non-strange dibaryons is needed to elucidate short-range NN interactions.

Inclusive J/ψ production as a probe of gluon dynamics at NICA

S. Sharma^{1*}, A. Aparin^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

² Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: s.sharma.hep@gmail.com

Inclusive J/ψ production in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 27$ GeV provides a valuable opportunity to investigate gluon dynamics in the moderate- x region accessible at the Spin Physics Detector (SPD) of the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA). In this work, we present a phenomenological study of quarkonium production near the kinematic threshold within the transverse-momentum-dependent (TMD) framework using the PEGASUS event generator.

Predictions are obtained with gluon TMD distributions based on the KMR and CCFM evolution schemes, allowing a systematic comparison of their effects on differential observables. Rapidity and transverse-momentum distributions are analyzed together with the dependence of the cross sections on the renormalization scale. In addition, normalized transverse-momentum spectra are investigated to isolate shape differences originating from gluon transverse-momentum broadening. The relative contributions of the color-singlet and color-octet production mechanisms are also examined in the SPD kinematic region.

The obtained results demonstrate that inclusive J/ψ production at NICA energies is sensitive to the underlying gluon transverse structure and therefore represents a promising probe of TMD dynamics in the moderate-energy regime. The presented predictions provide theoretical benchmarks for forthcoming measurements at SPD/NICA.

The reactions $dd \rightarrow dd\pi\pi$ and $pd \rightarrow pd\pi\pi$ and dibaryon resonances

Yu. N. Uzikov^{1*}, A. A. Temerbayev², N. T. Tursunbayev²

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

² L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

*e-mail: uzikov@jinr.ru

The resonance peak observed by WASA@COSY in the total cross section of the reaction of two-pion production in the isoscalar channel of the reaction $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$ [1] at invariant mass 2380 MeV with the width of 70 MeV, is considered as one of the most realistic candidate to the dibaryon resonance [2]. The isospin of this resonance is $I=0$ and spin-parity $iJ^P=3^+$. A similar resonance structure was observed by ANKE@COSY in the differential cross section of the two-pion production reaction $pd \rightarrow pd\pi\pi$ at beam energies 0.8–2.0 GeV with high transferred momentum to the deuteron at small scattering angles of the final proton and deuteron [3]. In this case the kinematic conditions differ considerably from that in Ref. [1] and two final pions not detected and, therefore, the isoscalar channel was not separated. Nevertheless, in the distribution over the invariant mass $M_{d\pi\pi}$ of the final $d\pi\pi$ system of the reaction $pd \rightarrow pd\pi\pi$ the resonance peak was also observed at $M_{d\pi\pi} \approx 2.38$ GeV [3]. In order to explain these data, in Refs. [4] the two-resonance model [5] of the reaction $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$ was applied by inclusion of the t-channel σ -meson exchange between the proton and deuteron in the reaction $pd \rightarrow pd\pi\pi$. Recently in Ref. [6] the reaction $\gamma d \rightarrow d\pi^0\pi^0$ was studied and an indication to excitation of isoscalar dibaryon resonance $D_{03}(2380)$ and more heavier dibaryons $d^*(2470)$ and $d^*(2630)$ was found. These resonances can be excited also in the reaction $dd \rightarrow dd^*$ at SPD NICA collider. In this work [7] we estimated the differential cross sections of the reactions $pd \rightarrow pd\pi\pi$ and $dd \rightarrow dd\pi\pi$ assuming excitation of the $D_{03}(2380)$ dibaryon by σ -meson exchange in t-channel as in Refs. [4] and calculated distributions over the invariant mass of the final $d\pi\pi$ system for these reactions.

This work is supported by the Scientific Programme JINR- Kazakhstan.

References

1. P. Adlarson [et al.] (WASA@COSY Collab.), Phys. Rev. Lett. **106**, 242302 (2011).
2. H. Clement, Prog. Part. Nucl. Phys. **93**, 195 (2017).
3. V. I. Komarov [et al.] (ANKE@COSY Collab.), Eur. Phys. J. A **54**, 206 (2018).
4. Yu. Uzikov, N. Tursunbayev, EPJ Web of Conf. **204**, 08010 (2019).
5. N. Tursunbayev, Yu. Uzikov, SciPost Phys. Proc. **3**, 056 (2020).
6. M. N. Platonova, V. I. Kukulín, Phys. Rev. C **87**, 025202 (2013).
7. T. C. Jude [et al.], Phys. Lett. B **832**, 137277 (2022).
8. Yu. N. Uzikov, A.A.Temberbayev, N.T. Tursunbayev, arXiv : 2511.00587 [nucl-th].

Минимизация объемных флуктуаций при поиске критической точки сильно взаимодействующей материи в релятивистских ядерных столкновениях

Г. А. Феофилов*, А. А. Зарщиков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: g.feofilov@spbu.ru

Негауссовы флуктуации [1] сохраняющихся величин – таких как суммарный электрический заряд, суммарная странность, суммарное барионное число, могут быть чувствительным индикатором близости критической точки, поиски которой интенсивно ведутся в настоящее время в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях. Высшие моменты распределений этих сохраняющихся величин связаны, в частности, с более высокими степенями значений корреляционной длины, которая, как ожидается [2], будет расходиться при приближении к критической точке сильно взаимодействующей материи, образующейся в результате столкновений. Однако исследования энергетической зависимости кумулянтов высокого порядка в $A + A$ столкновениях на RHIC и SPS пока не выявили убедительных доказательств критичности [3], [4].

Нами было показано ранее [5], что использование множественности частиц – в качестве наблюдаемой величины при выборе класса центральности ядро-ядерных столкновений, приводит к существенному вкладу объёмных флуктуаций, которые существенно искажают значения кумулянтов высоких порядков.

В представляемой работе, при отборе класса событий с определенными начальными условиями, рассматривается возможность уменьшения тривиальных объёмных эффектов путём перехода от такой наблюдаемой как множественность заряженных частиц – к числу нуклонов-участников столкновения.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Список источников

1. M. A. Stephanov, Phys. Rev. Lett. **102**, 032301 (2009).
2. Xiaofeng Luo, Nu Xu, Nucl. Sci. Tech. **28**, 112 (2017).
3. J. Adam [et al. STAR Collab.], Phys. Rev. Lett. **126**, 092301 (2021).
4. M. S. Abdallah [et al. STAR Collab.], Phys. Rev. Lett. **135**, 142301 (2025).
5. G. A. Feofilov, Phys. Part. Nucl. **57**(3), 401 (2026).

Mass spectrum of noncharmed and charmed meson states at finite temperature in extended linear-sigma model

A. V. Friesen^{1*}, Yu. L. Kalinovsky¹, A. N. Tawfik²

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Basic Science Department, Future University in Egypt, Egypt

*e-mail: avfriesen@mail.ru

The present study focuses on the low-energy phenomenology associated with quantum chromodynamics (QCD), where mesons and their interactions serve as the pertinent degrees of freedom, rather than the fundamental constituents of quarks and gluons. The presented work examines the mesonic potential contributions to the Lagrangian of the extended linear sigma model (eLSM) for (pseudo-)scalar and (axial-)vector meson fields across various quark flavors. Given that SU(4) configurations are completely based on SU(3) configurations, the possible relationships between meson states in SU(3) and those in SU(4) were explored at finite temperature. For the finite-temperature case the mean-field approximation with the Polyakov loop was used.

The temperature dependence of meson masses shows that although various meson states exhibit unique patterns in their mass changes with temperature, they all seem to share a similar range of dissolution temperatures. This implies that the critical temperature marking the phase transition from hadrons to quarks varies slightly depending on the meson states. Such near-universality of the dissolution scale suggests that the deconfinement transition is a relatively sharp phenomenon, despite the diversity of hadronic species. The quarkonium states, formed by a quark and its antiquark, are largely unaffected by variations in the temperature. This resilience makes heavy quark onia particularly useful probes of the hot medium, as they remain bound up to temperatures close to the transition.

Список источников

1. A. N. Tawfik, A. I. Ahmadov, A. Friesen, Yu. Kalinovsky, A. Aparin, M. Hanafy, *Particles*. **8**, 9 (2025).
2. A. Friesen, Yu. Kalinovsky, N. M. Rfeek, A. A. Alshehri, A. N. Tawfik, arXiv: 2512.22198, (2025) (under publishing in PRC).

Секция 5
Физика малочастичных систем

Section 5
Few-body systems

Возможное существование синглетного дейтрона как дибарионного резонанса и проблема существования динейтрона

С. Б. Борзаков

Лаборатория нейтронной физики имени И. М. Франка
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия
e-mail: sbor@nf.jinr.ru

В настоящей работе обсуждаются возможные эксперименты по поиску и определению характеристик синглетного дейтрона и динейтрона. Обычно взаимодействие нейтрона с протонов в ^1S -состоянии при очень низких энергиях описывается как проявление виртуального уровня. В настоящее время в ряде работ появилось утверждение, что виртуальный уровень – это дибарионный резонанс. Анализ данных по рассеянию показывает, что энергия резонанса отрицательна, то есть соответствует подпороговому состоянию. Синглетный дейтрон проявляется в рассеянии и захвате нейтронов протонами как резонанс типа Брейта-Вигнера. Положение, нейтронная и радиационная ширины уровня определяются длиной рассеяния, эффективным радиусом и сечением радиационного захвата нейтронов протонами. Обсуждаются возможные эксперименты по поиску этого уровня в радиационном захвате нейтронов протонами и в резонансном рассеянии гамма-квантов дейтронами. В силу принципа изотопической инвариантности должен также существовать динейтрон, поискам которого посвящено множество работ и в последнее время получены указания на его существование. Согласно принципу изотопической инвариантности, обнаружение синглетного дейтрона было бы подтверждением существования динейтрона.

Список источников

1. S. B. Borzakov. Phys. Atom. Nucl. **57**, 517 (1994).
2. T. Belgia, S. B. Borzakov, M. Jentschel, B. Maroti, Yu. N. Pokotilovski, L. Szentmiklosi. Phys. Rev. C **99**, 044001 (2019).
3. S. B. Borzakov. E-ArXive, nucl-ex: 2105.10286 (2021).
4. С. Б. Борзаков. Письма в ЭЧАЯ. **22**, 169 (2025).

Excited states of ${}^6\text{He}$ nucleus in the SS-HORSE–NCSM approach

M. K. Efimenko^{1*}, V. A. Kulikov², A. I. Mazur¹, I. A. Mazur³, I. J. Shin⁴, A. M. Shirokov²

¹Danilovsky Pacific National University, Khabarovsk, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Russia

³Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Russia

⁴Institute for Rare Isotope Science, Institute for Basic Science, Republic of Korea

*e-mail: ef.maria97@yandex.ru

The version [1] of the SS-HORSE–NCSM method [2] designed for studies of democratic decays into an odd number of fragments, was applied to calculate energies and widths of excited states of the ${}^6\text{He}$ nucleus. This method utilizes results of *ab initio* no-core shell model (NCSM) [3] calculations with the Daejeon16 [4] realistic nucleon-nucleon interaction in model spaces including all many-body states with up to $N_{\text{max}} = 18$ excitation quanta.

For the ${}^6\text{He}$ nucleus, we considered three-cluster asymptotics (${}^4\text{He} + n + n$) and derived the S -matrix of true $3 \rightarrow 3$ scattering in the minimal democratic decay approximation. Energies and widths were extracted by locating $3 \rightarrow 3$ S -matrix poles for a few excited states in the NCSM spectra of ${}^6\text{He}$.

This work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FEME-2024-0005).

References

1. I. A. Mazur, M. K. Efimenko, A. I. Mazur, I. J. Shin, V. A. Kulikov, A. M. Shirokov, J. P. Vary, Phys. Rev. C **110**, 014004 (2023).
2. A. M. Shirokov, A. I. Mazur, I. A. Mazur, J. P. Vary, Phys. Rev. C **94**, 064320 (2016).
3. B. R. Barrett, P. Navrátil, J. P. Vary, Prog. Part. Nucl. Phys. **69**, 131 (2013).
4. A. M. Shirokov, I. J. Shin, Y. Kim, M. Sosonkina, P. Maris, J. P. Vary, Phys. Lett. B **761**, 87 (2016).

Атом водорода в поле лазерного импульса в представлении параболических волновых пакетов

А. С. Зайцев*, Д. С. Зайцева, С. А. Зайцев

Тихоокеанский государственный университет имени М. П. Даниловского, Хабаровск, Россия

*e-mail: alzaytsev@togudv.ru

Достигнутый в разработке импульсных источников аттосекундного рентгеновского и ультрафиолетового излучения прогресс [1] даёт возможность существенно расширить круг временных явлений, изучаемых в атомах и молекулах. Полученные экспериментальные данные стимулировали развитие точных теоретических *ab initio* подходов к решению нестационарного уравнения Шрёдингера (TDSE) для атомных и молекулярных систем, облучаемых лазерными импульсами высокой интенсивности. В последнее время получили развитие подходы к TDSE, основанные на разложении искомой волновой функции по базисным функциям с параметрами, зависящими от времени, значения которых определяются вариационным принципом, зависящим от времени (TDVP) [2]. Наиболее широко используемой формулировкой является TDVP для гауссовых волновых пакетов (GWP) [3]. Такой подход позволяет не задавать явно размеры области пространства, в котором ищется решение, и тем самым избежать возможных нежелательных граничных эффектов. Мы предлагаем параболические волновые пакеты (PWP) [4] в качестве базиса для решения TDSE. Использование параболических координат, соответствующих выбору оси z , направленной вдоль вектора поляризации излучения, позволяет максимально учесть аксиальную симметрию задачи. Для извлечения амплитуды ионизации был применен метод [5], основанный на асимптотических свойствах результата действия функции Грина атомной системы на решение TDSE, взятое в момент окончания действия импульса. Благодаря свойствам базисных функций амплитуда ионизации выражается в аналитическом виде через параметры PWP. В качестве простейшей квантовой системы для исследования эффективности подхода использовался атом водорода в поле лазерного излучения. Расчеты амплитуды ионизации атомарного водорода согласуются с результатами, полученными другими методами в случае коротких лазерных импульсов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEME-2024-0005.

Список источников

1. F. Krausz, M. Ivanov, Rev. Mod. Phys. **81**, 163 (2009).
2. A. D. McLachlan, Mol. Phys. **8**, 39 (1964).
3. K. Rowan, L. Schatzki, T. Zaklama, Y. Suzuki, K. Watanabe, K. Varga, Phys. Rev. E **76**, 027313 (2020).
4. A. Zaytsev, D. Zaytseva, S. Zaytsev, L. U. Ancarani, Yu. Popov, K. Kouzakov, Eur. Phys. J. Plus **139**, 199 (2024).
5. A. Palacios, C. W. McCurdy, T. N. Rescigno, Phys. Rev. A **76**, 043420 (2007).

Ионизация атомов протонным ударом в представлении параболических квазиштурмовских функций

С. А. Зайцев^{1*}, Д. С. Зайцева¹, А. С. Зайцев¹, Л. У. Анкарани²,
Ю. В. Попов³, К. А. Кузаков³

¹Тихоокеанский государственный университет имени М. П. Даниловского, Хабаровск, Россия

²Университет Лотарингии, Франция

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелевца
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: 000282@togudv.ru

Ионизация атомов при столкновении с заряженными тяжелыми частицами является фундаментальным явлением как с точки зрения теории, так и практических приложений. Процесс однократной ионизации атома представляет собой сложную квантовомеханическую задачу для системы нескольких частиц при энергии выше порога распада с тремя свободными заряженными частицами в выходном канале. Для теоретического исследования ударной ионизации нами был разработан подход, основанный на разложении функции конечного состояния по сверткам параболических квазиштурмовских (CQS) функций [1]. Базисные CQS функции генерируются путем применения операторов функции Грина, отвечающих так называемым 2С и ПС модельным гамильтонианам [2] трехчастичной системы: рассеянный протон, ион-остаток и выбитый электрон. В 2С и ПС моделях два из трех кулоновских парных взаимодействий учитываются точно (с использованием различных наборов координат Якоби), тогда как третье взаимодействие описывается в рамках соответствующего уравнения Липпмана-Швингера (LS). При этом было численно продемонстрировано, что метод 2С + LS эффективен для описания механизма прямой ионизации, в котором преобладает взаимодействие между выбитым электроном и ион-остатком. В свою очередь, в режиме согласования скоростей (протона и электрона), когда необходимо учитывать канал электронного захвата, применение ПС модели демонстрирует явное преимущество в описании пика в угловом распределении выбитых электронов в направлении пучка налетающих протонов (прямой пик). В данной работе предложено обобщение CQS подхода, позволяющее рассмотреть с единых позиций как прямой механизм ионизации, так и канал захвата электрона протоном. С этой целью сформулирован анзац кулоновской трехчастичной функции Грина, такой что асимптотическое выражение для ядра результирующего оператора содержит волновую функцию модели 3С. Тем самым все кулоновское взаимодействие системы может быть учтено уже на этапе построения базисного набора. В данной работе, с целью проверки эффективности этого подхода, мы ограничились приближением нулевого порядка, которое непосредственно сводится к модели 3С. Наши расчеты ионизации атомарного гелия протонами при энергии 75 кэВ для различных режимов сравнивались с результатами экспериментальных [3] и теоретических исследований [4]. Достигнутое при этом согласие подтверждает эффективность разрабатываемого подхода.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEME-2024-0005.

Список источников

1. A. S. Zaytsev, D. S. Zaytseva, S. A. Zaytsev, L. U. Ancarani, K. A. Kouzakov, Phys. Rev. A **105**, 062818 (2022).
2. S. A. Zaytsev, D. S. Zaytseva, A. S. Zaytsev, L. U. Ancarani, K. A. Kouzakov, Yu. V. Popov, Phys. Rev. A **111**, 052812 (2025).
3. S. Majumdar, S. Bastola, A. Hasan, R. Lomsadze, M. Schulz, Phys. Rev. A **110**, 032814 (2024).
4. K. H. Spicer, N. W. Antonio, M. S. Schöffler, M. Schulz, A. S. Kadyrov, Phys. Rev. A **112**, 032806 (2025).

Resonances of a two-particle system on a 1D lattice

A. K. Motovilov*, S. S. Vetrov

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: motovilv@theor.jinr.ru

We consider a system of two spinless quantum particles (possibly with different masses) that hop from one site to another one on the integer lattice $\mathbb{Z}$. Unlike the counterpart in the continuous case, for any $N \geq 2$ the kinetic energy operator of a lattice N -body system does not allow elimination of the motion of the center of mass. However, being taken in quasimomentum representation, the N -body lattice Hamiltonian may be studied separately for any admissible value of the c.m. quasimomentum (see, e.g. [1], [2] and references therein). Such a reduced Schrödinger operator is usually called a fiber Hamiltonian. In the present work, we first prove that for a fixed value of the c.m. quasimomentum, the 1D lattice two-body kinetic energy operator is unitarily equivalent to a two-sided symmetric Jacobi operator (an infinite three-diagonal number matrix) on $\ell_2(\mathbb{Z})$ with the entries that are all real and do not depend on the site number. The resolvent of this operator admits exact analytic computation. As a function of the energy, its kernel (i. e. the Green's function) has a two-sheeted Riemann surface. For a sufficiently rapidly decreasing pairwise interaction potential, we then consider the Fredholm determinant associated with the corresponding Lippmann-Schwinger operator. Zeros of this determinant on the (real axis of the) physical sheet represent binding energies of the fiber Hamiltonian while poles on the unphysical sheet are treated as resonances. Finally, having taken potentials with one- or two-site support we arrive at exactly solvable problems. In this case at least for a part of the binding energies and resonances, we have obtained explicit analytic expressions. We have also plotted trajectories of the binding energies and resonances as the potential strength varies.

The first author (A.K.M.) kindly acknowledges the support of this work by Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan (Grant no. FZ-20200929224).

References

1. S. Albeverio, S. N. Lakaev, K. A. Makarov, Z. I. Muminov, Comm. Math. Phys. **262**, 91 (2006).
2. S. N. Lakaev, A. K. Motovilov, S. K. Abdukhakimov, J. Phys. A: Math. Theor. **56**, 315202 (2023).

Finding virtual states via wave-packet continuum discretization

O. A. Rubtsova^{1,*}, N. A. Ovsianikov²

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: rubtsova@nucl-th.sinp.msu.ru

Although virtual states correspond to nonphysical region, they affect the observables in elastic and inelastic collisions. The corresponding wave functions can be used in the amplitudes of inelastic processes such as quasi-elastic knockouts of nucleons from nuclei [1]. Recently the momentum distributions associated with the virtual states in two-nucleon system have been suggested [2] as the universal momentum distributions for the spin-singlet nucleon pairs within a general problem of short-range correlations (SRC) of nucleons in nuclei. At the same time, solving a problem for virtual states in practice is an uneasy task. In contrast to resonances, they cannot be found by using complex scaling. Solving the corresponding problem in configuration space may also lead to unstable solutions.

Here we suggest a new technique for finding the positions of virtual states and the respective wave functions (solutions of the homogeneous Lippmann-Schwinger equation) in momentum representation. The method is based on the formalism introduced in Ref. [3], which extends the Lippmann-Schwinger equation to the nonphysical energy region. In fact, this formalism employs a modification of the interaction which can be further substituted into the homogeneous Lippmann-Schwinger equation. For practical implementation, we use the wave-packet continuum discretization approach [4], which allows reducing an integral equation into matrix form. As a result, the procedure for finding the energy and wave function of the virtual state is nearly similar to that for bound states. Additionally, a problem of normalization of the resulting wave function and a generalized Fourier transform to configuration space according to Ref. [3] is considered.

As numerical examples, we demonstrate calculations for the virtual states in two-nucleon system for several models of NN-interaction, including fully realistic ones. The method can be directly generalized for finding resonances. Other L^2 bases, such as the Gaussian basis, can also be used in practice.

Список источников

1. A. B. Larionov, Yu. N. Uzikov, Phys. Rev. C **109**, 064601 (2024).
2. O. A. Rubtsova, V. N. Pomerantsev, L. D. Blokhintsev, Chin. Phys. C **49**, 104104 (2025).
3. Yu.V. Orlov, V. V. Turovtsev, Sov. Phys. JETP **59**, 934 (1984).
4. O. A. Rubtsova V. I. Kukulin, V. N. Pomerantsev, Ann. Phys. **360**, 613 (2015).

Поиск тринейтрона в реакциях поглощения остановившихся пионов ядрами ${}^9\text{Be}$

Ю. Б. Гуров^{1, 2}, С. А. Евсеев¹, С. В. Розов¹, М. В. Телькушев², Б. А. Чернышев^{2,*}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*e-mail: chernyshev@mephi.ru

Поиск тринейтрона ${}^3n$ проводился в реакциях поглощения остановившихся пионов ${}^9\text{Be}(\pi^-, d^4\text{He}){}^3n$ и ${}^9\text{Be}(\pi^-, t^3\text{He}){}^3n$. Корреляционные измерения спектров недостающих масс проводились с помощью многослойного полупроводникового спектрометра. В измерениях обеих реакций не было получено указаний на существование связанных состояний тринейтрона. При описании спектров суперпозицией распределений по фазовым объемам вблизи порога ($E_R \geq 0$ МэВ) наблюдалось превышение экспериментального спектра над расчетным. Однако недостаточная статистическая обеспеченность данных в этой области не позволило определить резонансные параметры этого превышения. В обеих реакциях были получены указания на существование двух относительно узких ($\Gamma \cong 3$ МэВ) резонансных состояний с $E_R \cong 6$ и 14 МэВ. В нескольких теоретических работах [F. M. Marqu'és and J. Carbonell, EPJA, 57, 105 (2021)] предсказывается существование таких высоколежащих состояний ${}^3n$, однако со значительно большими ширинами ($\Gamma \sim 10$ МэВ).

Исследование квантовой системы димера неона

Д. И. Шалапинин*, Е. А. Колганова

Лаборатория теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова
Объединённого института ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: shalapinin@theor.jinr.ru

В докладе исследуются связанные состояния димера неона ^{20}Ne , образованные ван-дер-ваальсовским взаимодействием. Дается обзор теоретических результатов и применимость дифференциального уравнения Шрёдингера в конфигурационном пространстве для неглубоких потенциалов. Проводится сравнительная характеристика с экспериментом, а также с результатами, полученными при альтернативном подходе в импульсном пространстве.

Ван-дер-ваальсовские кластеры привлекают значительный интерес в последние десятилетия, поскольку их изучение дает большой объем информации о молекулярных свойствах систем. Система неоновых димеров занимает промежуточное положение между квантово-механическими димерами гелия и классическими димерами более тяжелых благородных газов, что делает её удобным объектом для тестирования потенциальных моделей, численных методов и наблюдения эффектов, связанных с природой химически инертных ван-дер-ваальсовых связей.

Расчеты проводятся на основе стационарного уравнения Шрёдингера для относительного движения двух атомов в центрально-симметричном поле. Используется актуальный реалистический потенциал Хеллманна, а также потенциал Азиза–Сламана. Малая глубина потенциала и слабо затухающий характер на асимптотике объясняют наличие небольшого количества крайне слабых связей (< 25 К). Расчеты демонстрируют наличие возбужденных состояний при орбитальных моментах $l = 10$ включительно.

При $l = 0$ были найдены три колебательных уровня: 24,165 К, 4,323 К, 0,023 К, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [1] и современными расчетами [2] в импульсном пространстве. Показано, что потенциал Хеллманна точнее воспроизводит порог диссоциации, чем потенциал Азиза–Сламана.

Список источников

1. A. Wüest, F. Merkt, J. Chem. Phys. **118**, 8807 (2003).
2. R. Ahnouch and M. R. Hadizadeh, Sci. Rep. **15**, 11928 (2025).

3-3 рассеяние в системах трёх частиц с короткодействующими и кулоновскими взаимодействиями

С. Л. Яковлев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: s.yakovlev@spbu.ru

Дается асимптотическое решение задачи 3-3 рассеяния для частиц как с короткодействующими, так и с кулоновскими взаимодействиями. Волновые функции рассматриваются как распределения (обобщенные функции) по угловым переменным асимптотического импульса. Асимптотическое представление для волновой функции в случае короткодействующих взаимодействий получено с помощью изучения асимптотики преобразования Фурье решений уравнений Фаддеева. Асимптотические представления для волновой функции системы заряженных частиц получено уточнением решений для нейтральных частиц с помощью метода эйконала. Продемонстрированы эффекты асимптотического сглаживания для обоих случаев. Презентация основана на работах автора [1–4]

Список источников

1. С. Л. Яковлев. ТМФ, **206**, 79 (2021).
2. S. L. Yakovlev. JETP Letters, **116**, 268 (2022).
3. S. L. Yakovlev. Theor. Math. Phys., to appear (2026).
4. S. L. Yakovlev. Theor. Math. Phys., to appear (2026).

Секция 6
Ядерная астрофизика и физика нейтрино

Section 6
Nuclear astrophysics and neutrino physics

Precise reactor antineutrino spectrum measurement with TAO detector

M. B. Gromov^{1,2} (on behalf of the JUNO collaboration)

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: gromov@physics.msu.ru, mgromov@jinr.ru

The Taishan Antineutrino Observatory (TAO or JUNO-TAO) is a small near detector for the large far Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) in the reactor antineutrino experiment. The idea of JUNO is to determine the neutrino mass ordering by investigating the fine structure of the oscillated reactor antineutrino energy spectrum. TAO provides JUNO with the corresponding initial, model-independent spectrum and flux. The near detector is designed with a better energy resolution than its far counterpart. After finishing the commissioning phase and starting physics data taking in February 2026, the TAO detector demonstrates a resolution that is significantly superior to JUNO's 3,4% resolution at 1 MeV. This unprecedented result for scintillation detectors was achieved due to using 4024 silicon photomultiplier (SiPM) tiles that have high photon detection efficiency exceeding 50% and cover almost 95% of the inner surface of the TAO Central Detector. To suppress the SiPM dark count rate, the scintillator target is cooled to -50 °C. Antineutrinos are detected via inverse beta decay (IBD). This approach significantly reduces the background level. Additionally, the scintillator is doped with gadolinium and the fiducial volumes of about 1 t and 2 t are applied that helps in suppressing the background. There are also two external muon veto systems, namely a water Cherenkov detector (the Water Tank, WT) and a top veto tracker (TVT) made of plastic scintillator strips.

The TAO detector is located 44 m and 217 m from the two 4,6 GW_{th} cores of Units 1 and 2 of the Taishan Nuclear Power Plant, respectively. TAO was successfully launched and has been working reliably for more than six months now. About half of this time, the data was collected with both power units turned off. This provides a clean and quite detailed background spectrum which is subtracted from the full spectrum. The talk will present TAO's detector performance, its first precise measurement and prospects. The further physics program will also be discussed, including testing nuclear databases and different spectrum models, studying the 5 MeV spectral excess («bump»), measuring the isotopic composition of the burning fuel, monitoring nuclear reactor operational modes, evaluating the thermal power of the reactor, and searching for light sterile neutrinos.

Поиск тяжелого стерильного нейтрино в бета-распаде ^{144}Pr

А. В. Дербин*, И. С. Драчев, Д. В. Иванов, В. Н. Муратова, Н. В. Ниязова,
М. А. Панкратов, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова НИЦ КИ, Гатчина, Россия

*e-mail: Derbin_av@pnpi.nrcki.ru

Осцилляции трех известных типов нейтрино надежно зарегистрированы с использованием различных источников и детекторов нейтрино. Это открытие продемонстрировало, что флейворные состояния нейтрино представляют собой суперпозицию собственных массовых состояний. Три угла смешивания матрицы Понтекорво-Маки-Накагавы-Сакаты и две разности квадратов масс уже измерены с приемлемой точностью. Более тяжелые массовые состояния нейтрино (ν_H), если они существуют, должны быть связаны со стерильным нейтрино, на что указывает измеренная ширина распада Z -бозона. Гипотетические стерильные нейтрино могут проявляться при наблюдении осцилляций, в слабых процессах с рождением активных нейтрино и в распадах стерильных нейтрино на частицы Стандартной модели.

Изучение β -спектров различных ядер (^3H , ^{63}Ni , ^{35}S , ^{45}Ca , ^{64}Cu , ^{144}Pr), а также значений ft для свехразрешенных переходов в ядрах ^{35}S , ^{19}F , ^{19}Ne , ^{14}O и ^{20}F , строго ограничивают параметр смешивания $|U_{eH}|^2$ для нейтрино с массами в интервале от 10 эВ до 2 МэВ. Эксперименты с реакторными и солнечными ^8B -нейтрино, направленными на поиск распада $\nu_H \rightarrow \nu_L + e^+ + e^-$, устанавливают наиболее строгие пределы на $|U_{eH}|^2$ для масс нейтрино в диапазоне (2 – 10) МэВ. Для больших масс, $m_{\nu_H} \geq 10$ МэВ, верхние ограничения на параметр смешивания получены из данных по распадам пионов и каонов.

Источник электронных антинейтрино $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$ является одним из наиболее подходящих для поиска осцилляций в стерильное состояние с массой около 1 эВ. В тоже время, прецизионное измерение бета-спектра позволяет провести поиск нейтрино с массой вплоть до граничной энергии β -распада ^{144}Pr , которая составляет 3 МэВ [1]. Энергетический спектр $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$ был измерен специально разработанным $4\pi\beta$ -спектрометром, основанным на двух $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторах полного поглощения [2], [3]. Спектр был проанализирован с целью поиска вклада от тяжелого нейтрино с массой от 3 кэВ до 3 МэВ. Для нейтрино с массой в интервале (0.8 - 2.3) МэВ установлены новые верхние ограничения на параметр смешивания $|U_{eH}|^2$ на уровне $|U_{eH}|^2 \leq (0.1 - 1.0) \times 10^{-3}$ для 90% у.д.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-12-00046.

Список источников

1. A. V. Derbin [et al.], JETP Lett., **108**(8), 499 (2018).
2. I. E. Alekseev [et al.], Nucl. Instr. Meth. A **890**, 64 (2018).
3. A. V. Derbin [et al.], Phys. Rev. D, **112**(11), 112008 (2025).

Analysis of radiative capture of proton ^{11}B (p, γ) ^{12}C at low energy

A. Kabir

Institute of Space Technology, Islamabad, Pakistan

e-mail: kabirkhanak1@gmail.com

Within the potential model formalism, the ^{11}B (p, γ) ^{12}C process is investigated. The resonant and non-resonant transitions are taken into account for the low-lying states ($0.00(0^+)$, $4.44\text{ MeV } (2^+)$, and $9.64\text{ MeV } (3^-)$) of ^{12}C . Based on the total astrophysical S-factor, the capture rates are investigated. The present results for the astrophysical S-factor and rates were compared with existing measurements and predictions.

Эффекты динамо и осцилляций в спектрах нейтрино сверхновых

В. Н. Кондратьев*, А. А. Саймуха

Лаборатория теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: vkondrat@jinr.ru

Всплески нейтрино, излучаемых протонейтронной звездой при взрыве сверхновой, рассмотрены с учетом эффектов намагниченности и осцилляций. Показано ускорение нейтрино вблизи нейтриносферы из-за ядерного рассеяния, обусловленного взаимодействием нейтрального тока Гамова-Теллера [1]. Эффект осцилляций во внешних слоях звезд заметно усиливает жесткость спектра электронных антинейтрино. Такое увеличение высокоэнергетической составляющей спектра особенно значительно для обратного порядка масс и благоприятно для наземного обнаружения нейтрино сверхновых. Изучены возможности подводных черенковских детекторов – KM3NeT и Baikal-GVD – для наблюдения нейтрино сверхновых и выявления порядка масс.

Список источников

1. V. N. Kondratyev, Phys. At. Nucl. **86**, 1083 (2023).

Эффекты намагниченности ядер во взрывном нуклеосинтезе

В. Н. Кондратьев

Лаборатория теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия
e-mail: vkondrat@jinr.ru

Рассмотрен синтез ультранамагниченных тяжёлых атомных ядер, которые образуются при взрывах сверхновых II-го типа и слиянии нейтронных звезд [1]. Для магнитного поля напряженности 0,1–10 ТТл эффект Зеемана приводит к линейному ядерному магнитному отклику, который можно описывать в терминах магнитной восприимчивости. Под действием магнитных полей происходит увеличение доли ядер с массами меньше магической, а также увеличение объема нуклидов меньших масс в пике γ -процесса.

Список источников

1. V. N. Kondratyev, Universe. **7**, 487 (2021).

Characterization of the cosmic muon background in the ν GeN experiment

H. Le (on behalf of ν GeN collaboration)

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

e-mail: leviethuy1@duytan.edu.vn

The ν GeN experiment aims to detect coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS) using reactor antineutrinos and a specially designed low-background low-threshold germanium detector at the Kalinin Nuclear Power Plant [1]. Located at a shallow depth, the detector is subjected to a dominant background from cosmic muons, in which they induce secondary electromagnetic radiation and neutrons production within the shield. Characterization of this background is essential for the experiment's sensitivity to the CEvNS signal in the region of interest. This work presents the methodology and results of modeling the muon background using Monte Carlo simulation and experimental measurement employing a triple-coincidence muon telescope. The calculation of ν GeN site's overburden and muon flux spectrum with the dependency of zenith/azimuth angle, and muon-induced background in the shield are discussed.

References

1. I. Alekseev [et al.], ν GeN collaboration, Phys. Rev. D. **106**, L051101 (2022).

Search for the rare processes within the vGeN experiment at Kalinin Nuclear Power Plant

A. Lubashevskiy (on the behalf of the vGeN collaboration)

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia,
e-mail: lubashev@jinr.ru

The vGeN experiment is searching rare processes from antineutrino scattering at Kalinin Nuclear Power Plant (KNPP) at Udomlya, Russia. The experimental setup is installed under reactor unit #3 of KNPP on the moving platform, which allows changing the distance from the center of the 3,1 GW_{th} core from 11,1 to 12,5 m. In this way, we obtain an enormous antineutrino flux of $4,4 \cdot 10^{13}$ v/cm²/s. Construction materials of the reactor surrounding provide about 40 m w. e. overburden, which serves as a good shielding against cosmic radiation. In combination with a low ambient background, it gives us a unique opportunity to investigate antineutrino properties at the best experimental location in the world. To detect signals from the neutrino scattering, we use a high-purity, low-threshold germanium detector surrounded by passive and active shielding. A specially developed acquisition system allows suppressing events that correspond to noise. The current status of the experimental setup, data taking, and new results will be presented.

Условия появления Λ -гиперонов в материи нейтронных звёзд в моделях среднего поля

С. А. Михеев^{1,2*}, Д. Е. Ланской¹, А. И. Насакин^{1,2}, Т. Ю. Третьякова^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: mikheev.sa16@physics.msu.ru

Изучение барионных взаимодействий является актуальной задачей как для физики ядра и частиц, так и для физики нейтронных звёзд. Материя нейтронных звёзд имеет плотность в несколько раз превышающей ядерную и при этом обладает многими свойствами, схожими со свойствами обычной ядерной материи. Это делает нейтронные звёзды потенциальным источником ценной информации о барионных взаимодействиях в экстремальных условиях. Важной характеристикой материи нейтронных звёзд является плотность, при которой в ней становится энергетически выгодным образование гиперонов. Ранее было показано [1], [2], что эта величина тесно связана с максимальной массой нейтронной звезды.

В данной работе в рамках двух теоретических подходов, нерелятивистской модели Скимы и релятивистской теории среднего поля, исследуется зависимость плотности, при которой в материи нейтронных звёзд появляются Λ -гипероны, от характеристик гиперон-нуклонного взаимодействия.

Список источников

1. S. Mikheev, D. Lanskoj, A. Nasakin, T. Tretyakova. Particles. **6**, 847 (2023).
2. A. Nasakin, D. Lanskoj, S. Mikheev, T. Tretyakova. Phys. Part. Nuclei. **56** (3), 943 (2025).

Секция 7
Ядерная медицина, радиационная терапия
и радиозэкология

Section 7
Nuclear medicine, radiation therapy
and radioecology

Использование гамма-облученного оксида алюминия для изготовления генераторов технеция-99М

У. Т. Ашрапов*, С. С. Хужаев

Институт ядерной физики, Ташкент, Узбекистан

*e-mail: ashrapov_u@inp.uz

В настоящее время ^{99m}Tc используется в 80–85% всех диагностических исследований в ядерной медицине [1]. Сорбционный генератор $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ состоит из хроматографической колонки с Al_2O_3 с сорбированным материнским радионуклидом ^{99}Mo , получаемый в ядерном реакторе при облучение тепловыми нейтронами $^{98}\text{MoO}_3$ (обогащение $^{98}\text{Mo} > 98\%$) по реакции $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ [2]. Радионуклид ^{99m}Tc элюируется из генераторной колонки в форме натрия пертехнетата ($\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$), где ^{99m}Tc находится в состоянии (+7), тогда как в состоянии (+4) и (+6) ^{99m}Tc прочно сорбируется на Al_2O_3 , в результате которого выход ^{99m}Tc из колонки значительно снижается (до 50%). Для увеличения выхода Тс-99м из генераторной колонки применяют методы добавления к элюенту или к сорбенту окислительных агентов [3], [4]. В данном исследовании было изучено метод увеличения окислительных свойств сорбента Al_2O_3 при его предварительном гамма-облучение. Образцы сорбента Al_2O_3 массой по 1,0 г облучали на гамма-установке источником ионизирующего излучения Со-60 ГИК-7-4 при мощностях экспозиционной дозы 400 Р/сек и 2300 Р/сек до дозы $1 \cdot 10^8$ рад. Далее проводили контактирование гамма-облученного Al_2O_3 с 10 мл водных растворов $\text{Mo}(+5)$, $\text{I}(-1)$, $\text{Br}(-1)$ и $\text{Fe}(+2)$ в статическом режиме. При этом образовывались окислительно-восстановительные пары: $\text{Mo}(+5) \rightarrow \text{Mo}(+6)$; $\text{I}(-1) \rightarrow \text{I}(0)$; $\text{Br}(-1) \rightarrow \text{Br}(0)$; $\text{Fe}(+2) \rightarrow \text{Fe}(+3)$. Концентрацию окислительно-восстановительных пар определяли методом количественного химического анализа – титрования с использованием: диэтилдитиофосфорной кислоты для определения $\text{Mo}(+6)$, тиосульфат натрия для определения $\text{I}(0)$, йодид калия для определения $\text{Br}(0)$, сульфосалициловая кислота для определения $\text{Fe}(+3)$. На основании найденных концентраций окисленных форм окислительно-восстановительных пар [5] был найден нормальный окислительно-восстановительные потенциалы (редокс-потенциал) гамма-облученного Al_2O_3 , который составляет значение 1,33 В, при этом энергия отщепления электрона от соответствующих растворенных в воде частиц J составляет ~5,130 эВ. Результаты показали, что при гамма-облучении Al_2O_3 поглощенной дозой $1 \cdot 10^8$ рад окислительные свойства Al_2O_3 увеличивается ($\leq 20\%$), а при использование гамма-облученного Al_2O_3 в качестве сорбента в генераторной колонке, выход ^{99m}Tc при элюировании из генераторной колонки, увеличивается до 95 %.

Список источников

1. M. F. Navar, A. Türler. Front Chem. **10**, 926258 (2022).
2. H. Shameem, M. A. Prelas. Applied Sciences. **2**, 1782 (2020).
3. J. S. LiHyun [et al.], US Patent 2012/0244055, A1 (2012).
4. У. Т. Ашрапов, Н. А. Мирзаева, С. Султанов, С. Хужаев. Патент РФ № 2028679 (1991).
5. А. Н. Теренин. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. 1967. 616 с.

Спектральные измерения пучка быстрых нейтронов циклотрона У-120

М. М. Балачков^{1*}, А. А. Сорокина¹, Е. С. Сухих^{1,2}, Е. А. Селихова¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Научно-исследовательский институт онкологии

Томского национального исследовательского медицинского центра, Томск, Россия

*e-mail: mmb2@tpu.ru

В настоящее время нейтронная лучевая терапия представляет собой перспективный метод лечения радиорезистентных злокачественных новообразований. К особенностям данного метода относятся высокое значение линейной передачи энергии и пониженная зависимость биологического эффекта от концентрации кислорода в ткани, что является актуальным при лечении гипоксических опухолей, например, слюнных и щитовидной желез [1], [2]. Основой для клинического применения нейтронной лучевой терапии являются циклотроны. Примером подобной установки является циклотрон У-120, расположенный в г. Томске. Данная установка генерирует пучки быстрых нейтронов посредством бомбардировки бериллиевой мишени дейтронами.

Несмотря на длительную эксплуатацию циклотрона У-120, детальная характеристика спектральных компонент пучка требует уточнения. Существующие литературные данные ограничиваются устаревшими методами спектрометрии, что вносит существенные неопределенности в расчет поглощенной дозы. Кроме того, конструкция канала (полиэтиленовая защита, бетонные стены, сменные коллиматоры) за годы эксплуатации могла изменяться, что требует актуализации спектральных измерений.

В рамках данной работы проведено экспериментальное определение энергетического спектра быстрых нейтронов, генерируемых на циклотроне У-120. Использовалась система детектирования на основе МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей (сфер Боннера) диаметром 3, 5, 8, 10 и 12 дюймов. Измерения проводились на расстояниях 2,0; 2,5 и 3,3 м от среза терапевтического канала. Восстановление спектра выполнялось в соответствии с аттестованной методикой МТ АААА.7031.004-2020[3] с применением алгоритмов дифференциальной эволюции, случайного поиска, имитации отжига и метода Нелдера-Мида.

Установлено, что наиболее вероятная энергия быстрых нейтронов находится в диапазоне 3,16-5,01 МэВ. С увеличением расстояния от среза канала наблюдается смягчение спектра: тепловые нейтроны интенсивнее рассеиваются и поглощаются, в то время как доля быстрых нейтронов в относительном спектре возрастает. Полученные результаты имеют важное значение для уточнения дозиметрических расчетов и повышения точности планирования нейтронной лучевой терапии на циклотроне У-120.

Список источников

1. О. В. Грибова, Ж. А. Старцева, В. В. Великая [и др.], Вопросы онкологии. **71**(5), 2372 (2025).
2. В. М. Головков, В. А. Лисин, Л. И. Мусабаева [и др.], Известия высших учебных заведений. Физика. **56**(11–3), 173 (2013).
3. Восстановление энергетического спектра распределения плотности потока нейтронного излучения. Определение средней плотности потока нейтронного излучения (Методика (метод) измерений МТ АААА.7031.004-2020) : утверждены директором УП «АТОМТЕХ» В. А. Кожемякиным от 03.06.2020 / Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ» открытого акционерного общества «МНИПИ». 2023. 25 с.

Измерение сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$: особенности эксперимента и оценка неопределенностей

А. Г. Васильева*, М. Ю. Костин, В. А. Пикалов, Е. Н. Савицкая, О. В. Суманеев, А. А. Янович

Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова
Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

*e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

На базе действующего ускорительного комплекса У-70 в НИЦ «Курчатовский институт» – Института физики высоких энергий имени А. А. Логунова (ИФВЭ) ведётся подготовка к запуску первого в стране отечественного экспериментально-клинического комплекса углеродной ионной лучевой терапии [1]. В рамках данной работы ведется разработка оригинальной методики абсолютной калибровки ионизационных камер активационными детекторами при работе с выведенными пучками ускоренных ионов углерода. Методика позволяет реализовать калибровку ионизационных камер для измерения интенсивности пучка ионов углерода в диапазоне энергий 400–450 МэВ/нуклон, при этом используется низкофоновая радиометрическая установка, работающая по принципу γ - γ -совпадений [2], активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$.

Для повышения точности активационной методики и расширения ее применимости на более широкий диапазон энергий критически важно точно знать сечение реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$ в клинически значимом диапазоне 150–450 МэВ/нуклон. Однако на сегодняшний день экспериментальные данные по этому сечению доступны лишь для некоторых энергий, и между этими данными наблюдаются существенные расхождения [3], [4]. На ускорительном комплексе У-70 во время нескольких последних углеродных сеансов были получены новые экспериментальные значения сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$ в диапазоне энергий 280–450 МэВ/нуклон. Эксперименты были проведены на протонном синхротроне-бустере У-1.5, который входит в состав ускорительного комплекса У-70 в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Проведена определенная работа для учета и уменьшения неопределенностей в оценке сечений данной реакции. Введен поправочный коэффициент показаний активационного детектора при облучении пучком углерода с неоднородным профилем плотности потока частиц и его геометрическим положением. При помощи моделирования Монте-Карло была получена поправка на переход от точечного источника к объемному при измерении эффективности регистрации установки и поправка на число ^{11}C , образовавшегося и оставшегося в детекторе именно в результате реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$. Так же при помощи FLUKA [5] был рассчитан и введен поправочный коэффициент, учитывающий условия реальной геометрии эксперимента. Полученные результаты в целом имеют хорошее согласие с имеющимися общепринятыми данными.

Список источников

1. Ю. М. Антипова [и др.], ПТЭ. **8**, 139 (2025).
2. А. Г. Васильева [и др.], Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. **2**, 2520201 (2025).
3. F. Horst [et al.], Phys. Med. Biol. **64**, 205012 (2019).
4. G. Arico [et al.], Proc. EPJ Web Conf. **239**, 24001 (2020).
5. The official CERN FLUKA website. URL: <https://fluka.cern>.

Применение шумоподавляющих фильтров при плёночной дозиметрии радиохирургических планов лечения

К. В. Запорожская^{1*}, Е. Н. Лыкова¹, Г. В. Кичигин², А. А. Щербаков¹, А. П. Черняев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Россия

*e-mail: zaporozhskayakv@my.msu.ru

Радиохирургия представляет собой дистанционную лучевую терапию, где за один сеанс высокие дозы облучения доставляются в небольшие по объёму мишени [1], [2]. Данный метод требует высокой точности пространственного позиционирования дозового поля из-за резких градиентов дозы на границах мишени и критических структур. Для обеспечения качества индивидуальных планов лечения необходимо сравнить фактическое распределение дозы с запланированным. При верификации радиохирургических планов требуются детекторы, способные регистрировать высокие градиенты доз. Радиохромные плёнки обладают высоким пространственным разрешением, тканевой эквивалентностью и слабой зависимостью от энергии в терапевтическом диапазоне, что делает данный метод дозиметрии пригодным для контроля качества радиохирургического лечения [3]. Однако на точность плёночной дозиметрии влияют факторы окружающей среды, включая температуру и влажность при хранении и сканировании после облучения.

При верификации плёночной дозиметрии значительный вклад в неопределённость вносят шумы сканирования. Они обусловлены как несовершенством самой плёнки (изменения толщины активного слоя, микроцарапины, загрязнения), так и особенностями работы планшетных сканеров: неравномерностью освещения линейным источником, перекрёстными помехами и краевым рассеянием света. Особенно критичными такие артефакты становятся при анализе малых полей облучения, характерных для радиохирургических методик. Кроме того, периодическая калибровка сканера и использование методов коррекции фонового сигнала позволяют частично компенсировать инструментальные погрешности, но не устраняют их полностью. Один из подходов к снижению шума - применение пространственных фильтров, позволяющих повысить разрешение. Задача фильтра - сглаживать локальные выбросы, сохраняя средний сигнал. Важно отметить, что выбор фильтра должен учитывать характер шума: высокочастотный или импульсный, поскольку универсального алгоритма для всех случаев не существует. В работе исследованы три метода: медианная фильтрация, фильтр Савицкого–Голея и адаптивный фильтр среднего значения. Сравнение результатов обработки проводили по двум критериям: относительному изменению средней дозы и коэффициенту улучшения. Коэффициент улучшения рассчитывался как отношение дисперсии шумовой компоненты до фильтрации к дисперсии шумовой компоненты после фильтрации. Результаты показали, что оптимальным из трёх является адаптивный фильтр среднего значения. Он обеспечивает наилучший баланс между подавлением шума и сохранением крутых градиентов дозы, что критически важно для радиохирургической верификации. Таким образом, адаптивная фильтрация может быть рекомендована для рутинного применения в клинической практике при постобработке радиохромных плёнок.

Список источников

1. А. П. Черняев, Е. Н. Лыкова, А. И. Поподько, Медицинское оборудование в современной лучевой терапии : учеб. пособие, ООП физического факультета МГУ, **101** (2019).
2. M. J. Butson, P. K. N. Yu, T. Cheung, P. Metcalfe, Mater. Sci. Eng. R **41**, 61 (2003).
3. S. Devic, J. Seuntjens, G. Hegyi [et al.], Med. Phys. **31**(9) 2392 (2004).

Количественная оценка содержания тория и урана в свинце для радиационной защиты методом ИСП-МС

В. О. Зябченков^{1*}, Н. А. Мирзаев^{1,2}, Н. Д. Мохине¹, Д. В. Караиванов^{1,3}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт физики Министерства науки и образования Республики Азербайджан, Азербайджан

³Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, Болгария

*e-mail: vladislavzyabchenkov@mail.ru

Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к радиохимической чистоте материалов защиты от внешнего излучения для экспериментов по поиску явлений, предсказываемых физикой за пределами Стандартной модели. Даже ультрамалое (ppb-ppt) содержание радиоактивных изотопов (в основном из семейств урана, тория, радия, а также ^{40}K) создает фоновую активность, сравнимую по величине с искомыми сигналами. Также нежелательно содержание ряда нерадиоактивных элементов (лантаноиды, Al, Ag, Na и др.), так как они способны подвергаться активации мюонами и создавать ложные сигналы [1].

Одним из основных материалов для пассивной защиты от излучения является свинец [2], в частности археологический (свинец возрастом ~1500 лет), так как в нем практически не содержится ^{210}Pb с периодом полураспада 22,3 года, который вносит вклад в фон в низкофоновых экспериментах [3]. Применение метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) имеет особое значение из-за возможности экспрессного определения следовых количеств элементов на уровне ppb-ppt.

В настоящей работе с помощью ИСП-МС (SUPEC7000, ЛЯП ОИЯИ) изучен примесный состав Римского археологического свинца (Pb-арх), свинца из Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (Pb-БНО), коммерческого свинца марки C0000 (Pb 99.9999 %). Образцы свинца с массой 0.1 г растворяли под воздействием ультразвука в 7% HNO_3 . Полученный раствор 1% Pb разбавляли в 40 раз и добавляли внутренний стандарт индия, до концентрации 10 ppb. Для оценки матричного эффекта в качестве эталона использовался коммерческий свинец марки C0000. Пробоподготовка включала аналогичные стадии, однако вместо внутреннего стандарта In были добавлены многоэлементные стандарты А и В, концентрация которых в растворе составляла 10 ppb. Пределы обнаружения в ИСП-МС определялись при анализе холостого образца, подготовленного той же самой процедурой, но без добавления свинца. Результаты представлены в таблице.

Результаты анализа образцов на содержание Th, U (ppb)

Изотоп	ПО	Pb-C0000	Pb-арх	Pb-БНО
^{232}Th	0.103 ± 0.003	<ПО	<ПО	<ПО
^{238}U	1.61 ± 0.05	4.70 ± 0.14	<ПО	<ПО

Установлено, что концентрация урана и тория в археологическом и Баксанском свинце оказалась ниже предела обнаружения, что может свидетельствовать об их преимуществе для использования в низкофоновых экспериментах по сравнению с коммерческим свинцом марки C0000.

Список источников

1. N. A. Mirzayev [et al.], J. Radioanal. Nucl. Chem. **331**(12), 5539 (2022).
2. E. Armengaud [et al.], Astropart. Phys. **47**, 1 (2013).
3. N. T. Temerbulatova [et al.], J. Instrum. **20** (7), P07021 (2025).

Подход к оптимизации распределения поглощенной дозы в биологическом объекте в лучевой терапии пучком ускоренных протонов

В. А. Киселев^{1*}, А. П. Черняев², Ю. Д. Удалов³

¹Федеральный научно-клинический центр медицинской радиологии и онкологии, Димитровград, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына

Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Федеральный медицинский биологический центр имени А. И. Бурназяна, Москва, Россия

*e-mail: kiselevva@fnkcrio.ru

Протонная терапия сопряжена с неопределённостями: изменения анатомии, ошибки укладки, а также флуктуации параметров самого пучка (положение и размер пятна, работа системы выбора энергии). Большинство исследований фокусируются на анатомических и диагностических ошибках, тогда как аппаратно-зависимые неопределённости, специфичные для каждой установки, учитываются реже. На основе предыдущих экспериментальных измерений на системе IBA Proteus Plus нами была оценена неопределённость доставки порядка 1 мм. Цель работы – проверить достаточность дополнительного запаса в 1 мм и сравнить два подхода к планированию: классический PTV-метод и робастную оптимизацию.

В исследование включено 8 пациентов с опухолями головного мозга (объём CTV от 23 до 80 см³). Планы IMPT рассчитаны в системе Pinnacle³. PTV-подход: равномерный отступ 3 мм (укладка) + 3,5% (пробег). Робастный подход: оптимизация непосредственно на CTV с теми же неопределённостями. Для имитации аппаратной ошибки в анализ робастности добавлено смещение 1 мм, что дало суммарную неопределённость положения 4 мм. Для каждого плана проанализировано 16 сценариев (сдвиги по осям, ошибки пробега). Оценивались покрытие CTV изодозами 100% и 95%, индексы конформности (CI100, CI95) и гомогенности (HI).

Исходные планы (без внесения ошибок) не различались по покрытию CTV и CI100. PTV-планы ожидаемо оказались более гомогенными, однако оба подхода давали клинически приемлемые значения. При внесении дополнительной аппаратной неопределённости (1 мм) робастная оптимизация продемонстрировала явное преимущество. Покрытие CTV дозой 100% в среднем составило 96% для робастных планов против 79% для PTV-планов; разница статистически значима. В подавляющем большинстве сценариев робастный подход обеспечил лучшее сохранение мишени внутри изодозы, более высокую конформность (особенно для CI100) и, что важно, полностью исключил «провалы» покрытия, которые наблюдались при PTV-подходе. Гомогенность также была несколько лучше при робастной оптимизации.

Учёт аппаратно-специфических неопределённостей доставки пучка (порядка 1 мм) необходим при планировании протонной терапии. Робастная оптимизация существенно превосходит PTV-подход по устойчивости к таким ошибкам, обеспечивая стабильное покрытие мишени и высокую конформность дозы даже при суммарной неопределённости 4 мм/3,5%. Рекомендуется определять фактические неопределённости для каждой конкретной системы и использовать робастное планирование как предпочтительный метод. Требуются дальнейшие исследования в анатомически сложных зонах (голова и шея, лёгкие).

Список источников

1. V. A. Kiselev [et.al.], Moscow Univ. Phys. V **79**(4), P 516-523 (2024).
2. V. A. Kiselev [et.al.], J. Appl. Clin. Med. Phys. E **26**(11), 70355 (2025).
3. L. Grevillot [et.al.], J. Appl. Clin. Med. Phys. E **24**(4), 13896 (2023).

Применение деформируемой регистрации изображений в лучевой терапии

Е. А. Копылова^{1,2*}, Г. Е. Горлачёв³, Е. Н. Лыкова^{1,2}, И. А. Суворов¹, А. П. Черняев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Москва, Россия

³ООО «Радиационно-онкологические интеллектуальные системы и сервисы», Москва, Россия

*e-mail: ekaterinakalip@gmail.com

Регистрация изображений необходима во многих задачах медицинской физики. Деформируемая регистрация изображений (ДРИ) – это процесс преобразования изображений в одну систему координат. Преобразования осуществляются нелинейные, в том числе происходит локальное сжатие и растяжение объёмов. ДРИ применяется в адаптивной лучевой терапии [1] и при планировании повторного облучения. В первом случае необходимо скорректировать план лучевого лечения из-за изменившейся геометрии пациента во время курса лечения. Во втором случае необходимо рассчитать суммарную поглощенную дозу в органах и тканях от разных курсов лечения. Другим направлением применения ДРИ является сегментации органов с использованием атласа – предварительно размеченного КТ-изображения. В лучевой терапии рака лёгких деформируемая регистрация используется для автоматического определения внутреннего объёма облучения [2] и расчёта пространственного распределения газообмена.

Цель работы – разработать метод деформируемой регистрации КТ – изображений лёгких, позволяющий рассчитывать дозовую нагрузку на дыхательные пути и функционально значимые области лёгких. В качестве алгоритма совмещения был выбран модифицированный метод «Демоны» [3]. Метод итеративно вычисляет перемещения вокселей, используя интенсивности и градиенты интенсивностей изображений. Регуляризация выполняется с помощью фильтра Гаусса. Для повышения эффективности регистрации применяется подход множественного разрешения. Алгоритм реализован на языке программирования C#. Для получения пространственного распределения газообмена в лёгких рассчитывался Якобиан перемещений вокселей.

Было показано, что алгоритм совмещения демонстрирует низкую эффективность при значительных смещениях вокселей. Кроме того, регуляризации с помощью фильтрации недостаточно для корректного вычисления пространственного распределения газообмена. Несмотря на существенные ограничения метода, при совмещении похожих изображений алгоритм имеет точность до 19%. Это позволяет его применять для задач совмещения структур на КТ-изображениях пациента, сделанных между разными фракциями лечения или фазами дыхания.

Список источников

1. X. Gu, B. Dong, J. Wang [et. al.], Phys. Med. Biol. **58**(6), 889 (2013).
2. E. Dam, J. R. Sornsen de Koste, G. G. Hanna [et. al.], Rad. Oncol. **96**(1), 67 (2010).
3. H. Wang, L. Dong, J. O'Daniel [et. al.], Phys. Med. Biol. **50**(12), 2887 (2005).

Фотоядерное получение медицинских изотопов рения на осмиевых и иридиевых мишенях

А. А. Кузьменков¹, М. В. Желтоножская^{1*}, В. Д. Пупышев¹, А. П. Черняев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: zhelton@yandex.ru

Тераностика – одно из наиболее перспективных направлений ядерной медицины. Изотопы рения (^{186}Re , ^{188}Re , ^{189}Re), испускающие β^- -частицы для терапии и γ -кванты для визуализации, рассматриваются как перспективные кандидаты для создания радиофармпрепаратов. Традиционные реакторные и циклотронные методы их получения ограничены высокой стоимостью и дефицитом установок. Альтернативой могут быть фотоядерные реакции с вылетом заряженных частиц на осмии и иридии. Однако экспериментальные данные для тяжёлых ядер ($A > 90$) в указанном диапазоне энергий малочисленны, а теоретические расчёты в рамках каскадно-испарительных моделей с использованием программного кода TALYS зачастую расходятся с экспериментальными значениями на порядки, в частности, из-за недоучета прямых механизмов ядерных реакций.

Целью работы являлось исследование получения изотопов рения в фотоядерных реакциях на мишенях осмия и иридия. Для этого была проведена серия облучения мишеней осмия естественного изотопного состава и обогащенных по ^{192}Os , а также мишеней естественного иридия тормозным излучением с граничными энергиями тормозного излучения 23 и 55 МэВ. Полученные средневзвешенные по спектру тормозного излучения выходы реакций образования ^{186}Re , ^{188}Re , ^{189}Re сравнивались с теоретическими расчетами в рамках каскадно-испарительной модели с использованием кода TALYS2.2 и с учетом полупрямых механизмов. Показано, что наиболее точное описание результатов эксперимента достигается при учете изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса. На основе адаптированного теоретического подхода проведены расчеты выходов активности изотопов рения для граничных энергий тормозного излучения 25, 30, 35, 40, 45 и 55 МэВ и определен оптимальный диапазон энергий тормозного излучения для наработки медицинских изотопов рения – около 30 МэВ. Установлено, что использование иридия в качестве мишени для получения медицинских изотопов рения нецелесообразно из-за низких выходов (γ , $\alpha\chi_n$) реакций. Для мишеней из природного осмия, образующих многокомпонентный источник радиоизотопов рения, проведена оценка вклада каждого радиоактивного изотопа рения в суммарную дозу препарата. Полученные результаты обобщаются.

Биофизическая модель электрических характеристик эритроцитов при лучевой терапии

С. Н. Мамаева^{1*}, А. Н. Павлов¹, М. Н. Румянцева^{1,2}, Т. А. Крылова¹, Г. В. Максимов³

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

²Якутский республиканский онкологический диспансер, Якутск, Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия

*e-mail: sargylana_mamaeva@mail.ru

Известно, что у онкологических больных наблюдаются характерные изменения морфологии эритроцитов (в том числе микроцитоз, наличие большого количества сфероцитов), которые сопровождаются железодефицитным эритропоэзом, а также появлением гипохромных эритроцитов, [1], [2]. Лучевая терапия (ЛТ) зачастую приводит к увеличению концентрации дисморфных эритроцитов [3]. В данной работе предложена биофизическая модель, описывающая взаимосвязь изменения форм и размеров, а также электрических характеристик эритроцитов при онкологии и ЛТ. Для построения модели использовали результаты исследования морфологии эритроцитов, проведенные с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Модель сформулирована согласно предположению, что кулоновские взаимодействия могут выполнять роль факторов образования в сосудах крови комплексов из отдельных эритроцитов («монетные столбики» из эритроцитов). Для формирования модели разработанная теория описания распределения напряженности поверхностного электрического поля мембраны эритроцита и оценка его изменений при патологии и воздействии радиации, а также характерная зависимость электрофоретической подвижности эритроцитов (ЭФ-ПЭ). Модель основана на предположении наличия сферических, эллипсоидных форм эритроцитов, что подтверждается результатами исследований венозной крови пациентов с диагнозом рак шейки матки с помощью СЭМ. Модель позволяет доказать, что динамика эритроцитов в буферной жидкости с учетом изменений морфологии эритроцитов и их электрических параметров хорошо согласуется с результатами исследований ЭФ-ПЭ у пациентов при злокачественных новообразованиях [4]. Результаты предложенной модели предлагается использовать при разработке новых подходов диагностики состояния эритроцитов, например, при применении трансфузии эритроцитарной массы крови для поддержания оптимального уровня кислородтранспортной функции эритроцитов при проведении ЛТ [2].

Список источников

1. А. Ю. Федотова, Т. П. Генинг, Т. В. Абакумова [et al.], Казан. мед. ж. **100**(5), 855 (2019).
2. А. В. Снеговой, В. Б. Ларионова, Л. В. Манзюк [et al.], Клин. онкогематол. **9**(3), 326 (2016).
3. S. N. Mamaeva, I. V. Kononova, M. Ruzhansky [et al.], Int. J. Biomed **10**(1), 70 (2020).
4. М. Н. Макарова, И. Д. Грачева, Р. А. Новикова [et al.], Наука молодых–Eruditio Juvenium **5**(3), 361 (2017).

Корректировка и валидация алгоритма оценки пробега протонов в различных материалах на основании КТ-исследований

Г. В. Мерзликин^{1,2*}, А. И. Адарова¹, В. О. Сабуров^{1,3}, С. Н. Корякин¹

¹Медицинский радиологический научный центр имени А. Ф. Цыба, Обнинск, Россия

²Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

³Томский политехнический университет, Томск, Россия

*e-mail: grishamerzlikin@gmail.com

Соотношение между пробегами протонов различных начальных энергий и самой энергией в воде чётко определено. Однако, ткани в теле пациента могут существенно отличаться от воды по плотности, электронной плотности и элементарному составу. Предсказание пробега при планировании протонной и ионной терапии обычно опирается на данные КТ-исследований пациентов. Корректность задания кривой перехода от единиц Хаунсфилда, получаемых в результате КТ-исследований, к тормозным способностям протонов в материалах определяет точность предсказания пробега протонов в теле пациента при подготовке терапевтического плана в системе дозно-аналитического планирования. Водозэквивалентная толщина, характеризующаяся толщиной слоя воды, требуемого для замедления пучка частиц на такое же количество энергии, насколько он замедляется в данном материале, связана с относительной тормозной способностью протонов линейным соотношением. С другой стороны, водозэквивалентная толщина является косвенно измеряемой, которую можно определить экспериментально. В данной работе кривая перехода от единиц Хаунсфилда к величине, определяющей энергетические потери протонов, построена на основании измеренных водозэквивалентных толщин 9 одинаковых по размерам цилиндров тканевого эквивалента различной электронной плотности. С использованием полученной кривой проведено определение водозэквивалентных толщин сборок из нескольких пластин разного тканевого эквивалента двумя независимыми способами: в системе дозно-аналитического планирования «Protom therapy planner» и путём косвенных измерений на КПТ «Прометеус». Сделан вывод о возможности использования описанного алгоритма перехода от единиц Хаунсфилда к тормозным способностям протонов в ходе терапевтического планирования облучения пациентов на КПТ «Прометеус».

Список источников

1. C. G. Ainsley, C. M. Yeager, J. Appl. Clin. Med. Phys. **15**(3), 4721 (2014).
2. R. Zhang, W. D. Newhouse, Phys. Med. Biol. **54**(6), 1383 (2009).

Реконструкция трёхмерного дозового распределения при облучении биологических объектов пучками протонов высокой интенсивности

Г. В. Мерзликин^{1*}, С. В. Акулиничев^{1,2}, Д. Г. Тагабилев², И. А. Яковлев^{1,2}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского, Москва, Россия

*e-mail: grishamerzlikin@gmail.com

Флэш-терапия с использованием пучков протонов высокой интенсивности сейчас рассматривается как перспективное направление развития лучевой терапии в онкологии и активно исследуется во многих научных центрах мира, в том числе и с использованием животных моделей (лабораторных мышей, крыс и т.д.). Характеристики линейного сильноточного ускорителя ИЯИ РАН позволяют реализовать фракцию флэш-терапии с ультравысоким током облучения одним мощным импульсом протонов. Однако, для проведения исследований с лабораторными животными необходимо обеспечить локальное облучение изначально широким пучком новообразований размером около или менее 15 мм. При этом для качественного проведения экспериментов требуется минимизировать лучевую нагрузку на соседние нормальные ткани и вторичный фон нейтронов от коллимирующего устройства. Плёночная дозиметрия является золотым стандартом при измерении характеристик облучения с высокой мощностью и малых полей, требуемых для стереотаксического облучения. Однако, результирующее дозовое распределение, полученное с использованием плоского детектора, не может предоставить необходимую информацию о трёхмерном распределении дозы, требующуюся для корректной оценки поглощённой дозы в мишени. Восстановление характеристик результирующего дозового распределения в условиях, когда спектр вылетающих из коллиматора протонов известен, а поперечное пространственное распределение частиц измерено плёнкой, является важной практической задачей. Метод Монте-Карло является одним из наиболее точных и распространённых инструментов расчёта задач, связанных с транспортом частиц и взаимодействия излучения с веществом. Математическая модель системы пассивного формирования комплекса протонной терапии ИЯИ РАН [1] в программном пакете TOPAS MC [2] с высокой точностью описывает поведение пучка в процедурной. Как показали предыдущие исследования, свойства разработанного в ИЯИ комбинированного коллиматора также хорошо описываются данной моделью. Внесение коллиматора в расчётную геометрию позволяет оценить спектр протонов, влияние на этот спектр отклонения оси коллиматора от оси пучка и результирующее дозовое распределение. В работе рассмотрена реализация ретроспективного восстановления трёхмерного дозового распределения методом Монте-Карло на основании данных радиохромных плёнок, использованных в экспериментах по облучению лабораторных животных в режимах высокой интенсивности пучков протонов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-15-00040.

Список источников

1. G. V. Merzlikin, S. V. Akulinichev, I. A. Yakovlev. Moscow Univ. Phys. Bull. **11** (2023).
2. J. Perl, J. Shin, J. Schmann, B. Faddegon, H. Paganetti. Med Phys (2012).

Методика дозиметрии источника для электронной поверхностной брахитерапии

Е. Н. Лыкова^{1,2}, В. Р. Оганян², Е. А. Новикова^{1*}, А. П. Черняев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Москва, Россия

*e-mail: evgeniyanovikovazar@gmail.com

В электронных системах брахитерапии в качестве источника терапевтического излучения используется электрически генерируемое излучение, а не классические радионуклидные источники. Основным преимуществом данных аппаратов является возможность проведения контактной лучевой терапии в условиях с минимальными требованиями к радиационной защите [1]. В настоящее время на рынке имеется несколько таких систем, одна из которых Elekta Xofter Axxent, нашедшая применение для интраоперационной, внутрисполостной и поверхностной брахитерапии. Лечебный источник аппарата Xofter (модель S700) представляет собой миниатюрную 50 кВ рентгеновскую трубку, интегрированную в гибкий футляр, внутри которого циркулирует охлаждающая жидкость [2]. Данную методику можно использовать для лечения немеланомного рака кожи с помощью поверхностных конических аппликаторов (10, 20, 35 и 50 мм диаметром) [3]. Для введения в эксплуатацию каждого нового такого источника необходимо провести комплекс измерений для калибровки источника [1].

В настоящей работе представлены результаты измерения номинальной выходной мощности дозы на поверхности кожи для каждого диаметра аппликатора, стабильности выходного сигнала, времени выхода источника на номинальную мощность и проверки глубинного распределения дозы. Абсолютная дозиметрия проводилась в воздухе согласно формализму AAPM Task Group 61 (TG-61) [4] с использованием ионизационной камеры Exradin A20. Глубинные дозовые распределения были измерены в фантоме твердой воды, состоящем из набора пластин водозквивалентного материала, двумя способами: с использованием ионизационной камеры и радиоохромных пленок Gafchromic EBT3.

Проведённые измерения подтверждают соответствие дозиметрических характеристик источника Xofter Axxent данным производителя и требованиям протокола TG-61, а также возможность безопасного использования набора поверхностных аппликаторов для лечения немеланомного рака кожи.

Список источников

1. Thomadsen, R. Bruce [et al.], Electronic intracavitary brachytherapy quality management based on risk analysis : the report of AAPM TG 182, Medical physics, **47**(4), e65-e91 (2020).
2. Axxent® Controller Software Versions 1.30 and 1.40 Release Notes, 750072 Rev. E (2017).
3. Axxent® Surface Applicator Instructions for Use, 750779 Rev. J (2019).
4. C.-M. Ma [et al.], Report No. 076 - AAPM protocol for 40–300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology, Medical Physics, **28**, 868 (2001).

Биофизическое моделирование распределения температуры при гипертермии: обзор алгоритмов и проектирование расчётного модуля

В. Р. Оганян^{1,2*}, Г. Е. Горлачев³, В. Н. Беляев¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия

²Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Москва, Россия

³ООО «Радиационно-онкологические интеллектуальные системы и сервисы», Москва, Россия

*e-mail: vahe.ohanyan2000@yandex.ru

Гипертермия является методом комбинированного онкологического лечения, основанном на локальном повышении температуры биологических тканей до терапевтического диапазона 40–45 °С. Нагрев ткани способствует усилению чувствительности опухолевых клеток к лучевой и химиотерапии, однако эффективность процедуры напрямую зависит от точности контроля распределения температуры в тканях. Учитывая, что при повышении температуры опухоли на 1 °С в терапевтическом диапазоне клеточная выживаемость после облучения может снижаться примерно в 2 раза [1], расхождение между запланированным и достигнутым нагревом на 1 °С в мишени существенно влияет на эффективность лечения и токсичность для нормальных тканей. Неоднородность анатомических структур, различия теплофизических свойств тканей и влияние кровотока существенно усложняют прогнозирование температурных полей при гипертермическом воздействии. Неопределённость параметров перфузии, их пространственной неоднородности и возможной динамики в ходе сеанса рассматривается как одна из ключевых проблем моделирования переноса теплоты в биологической ткани [2]. В современных концепциях планирования существенную роль играет МРТ: построение анатомической модели, оценка электрофизических характеристик тканей для расчёта удельной мощности поглощения, а также МР-термометрия для верификации нагрева. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов биофизического моделирования теплопереноса и создание специализированных расчётных программных средств [3]. Целью данной работы является создание прототипа системы планирования гипертермии обеспечивающего загрузку томографических данных пациента, численный расчёт распределения и визуализацию пространственно-временного распределения температуры на основе моделей биотеплопереноса.

На экспериментальной платформе RORMIA был разработан прототип модуля планирования гипертермии. Программный комплекс обеспечивает загрузку и обработку медицинских изображений для последующего моделирования распределения температуры с учётом анатомической гетерогенности биологических тканей, а также пространственного распределения их диэлектрических и теплофизических характеристик.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для дальнейшего развития программного комплекса биофизического моделирования гипертермии, включая интеграцию методов автоматической сегментации мягких тканей, учёт перфузии крови в процессах теплопереноса, а также моделирование теплового источника на основе экспериментальных данных.

Список источников

1. Kok H. P., Crezee J., IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol. **5**(3), 214 (2021).
2. Yuan X. [et al.], Results Eng. **28**, 107499 (2025).
3. Gavazzi S. [et al.], Int. J. Hyperthermia. **37**(1), 992 (2020).

Optimization of photoneutron source parameters for boron neutron capture therapy

E. A. Onischuk^{1*}, Yu. A. Kurachenko¹, A. P. Chernyaev², V. V. Rozanov², A. A. Kim²

¹Institute of Nuclear Physics and Engineering, Obninsk, Russia

²M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: elenaonischuk@yandex.ru

Boron neutron capture therapy (BNCT) is a promising treatment for malignant tumors based on the selective absorption of low-energy neutrons by ^{10}B nuclei, releasing 2,34 MeV of energy in tumor cells. The main limitation to the widespread clinical use of BNCT is the lack of compact, safe, and efficient neutron sources. Accelerator-based neutron sources offer an alternative; however, their development requires addressing complex challenges such as high thermal loads, radiation resistance of materials, and optimization of epithermal neutron yield [1].

Objective: To conduct model calculations for a photoneutron source based on an electron accelerator (35 MeV, 4 mA) with a combined tungsten-liquid gallium target to generate epithermal neutrons suitable for BNCT. To optimize the geometry of the target, reflector, and beam extraction unit to maximize the epithermal neutron flux density while minimizing associated γ -radiation and fast neutrons.

Target Design: The combined target consists of a stationary tungsten matrix and flowing liquid gallium (melting point 29,8 °C, high thermal conductivity). Gallium serves as a coolant and an additional neutron source.

Computational Methods: Neutronics calculations - Monte Carlo method (MCNP5 code) with the TENDL-2014/2017 nuclear data library. Thermohydraulic calculations – STAR-CD code.

The W+Ga target turned out to be optimal [2]: neutron yield of $1,6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$, γ -radiation $3,3 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$ at a beam power of 140 kW. At a gallium velocity of 2 m/s, the maximum temperature is: Ga – 535 °C, W – $\sim 1400^\circ\text{C}$. With an increase in velocity to 4 m/s, the gallium temperature decreases to 290°C, and tungsten – 100 °C lower. Placing the target in a tungsten sphere (2 cm thick) reduces the maximum coolant temperature to 310 °C at the same velocity. Beam extraction unit upgrade: removal of the cadmium plate, replacement of zirconium hydride with lead, transition to a coaxial configuration. Result: epithermal neutron flux density at the patient's position reached $2,04 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

The proposed two-stage scheme ($e^- \rightarrow \gamma \rightarrow n$) ensures relatively low sensitivity of the neutron yield to geometric variations ($\pm 10\%$), simplifying engineering implementation. Liquid gallium, despite its aggressiveness toward structural materials, offers two key advantages: low activation with a rapid activity decay and efficient heat removal. The tungsten matrix and spherical reflector simultaneously increase the neutron yield and suppress γ -radiation through photon absorption. The obtained beam characteristics exceed the minimum therapeutic requirements for BNCT and open the possibility of creating a compact clinical neutron source based on an electron accelerator.

References

1. M. Suzuki, Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. **106**(3), 440 (2019).
2. Yu. A. Kurachenko, Yu. G. Zabaryansky, E. A. Onishchuk, MRRS **62**(3), 33 (2017).

Реализация работы с данными КТ в системе планирования ионной лучевой терапии

Е. В. Парменова*, О. П. Ющенко

Институт физики высоких энергий
Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия
*e-mail: Ekaterina.Parmenova@ihep.ru

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (г. Протвино) на базе действующего Ускорительного комплекса У-70 реализуется проект первого в России центра ионной лучевой терапии, в котором будет осуществляться терапевтическое облучение пучками ионов углерода [1]. В рамках этого проекта разрабатывается уникальная система дозно-анатомического планирования (СДАП).

Данная система, как и любая современная планирующая система для лучевой терапии, будет формировать индивидуальный план облучения на основе данных КТ и клинических предписаний онкологов. Для этого в ней должна быть организована работа с результатами КТ-сканирования пациента и областями интереса (ROI), отмеченными врачом. Эти данные хранятся в файлах в формате DICOM [2], структура которого достаточно сложна и нуждается в специальной обработке. Кроме того, в СДАП должна быть предусмотрена работа с полученными из DICOM-файлов медицинскими изображениями. Такая возможность нужна, чтобы контролировать зоны облучения и при необходимости их корректировать.

В работе представлены модули системы планирования, предназначенные для работы с файлами в формате DICOM и результирующими изображениями. Продемонстрирована программа для обработки DICOM-файлов, реализованная на C++ с использованием библиотеки DCMTK [3]. Показана организация работы с медицинскими изображениями посредством графического интерфейса, разрабатываемого на основе Qt [4], а также сопутствующие методы цифровой обработки данных изображений.

Список источников

1. Д. А. Васильев [и др.], Сборник тезисов XXIX международной конференции «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'2025» С. 258. (2025).
2. Медицинский отраслевой стандарт создания, хранения, передачи и визуализации цифровых медицинских изображений и документов обследованных пациентов. URL: <https://www.dicomstandard.org>.
3. Стандарт DICOM. URL: <https://dcmkt.org/dcmkt.php.en>.
4. The Qt project. URL: <https://contribute.qt-project.org>.

Трекинг, измерение энергии и получение диагностических изображений с использованием кремниевых пиксельных сенсоров

В. В. Петров*, В. И. Жеребчевский, Н. А. Мальцев,
Н. А. Прокофьев, Е. О. Землин, А. О. Скалецкий

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.petrov@spbu.ru

Протонная компьютерная томография (ПКТ) является перспективным методом планирования лечения онкологических заболеваний с помощью методов адронной (протоны и ионы углерода) терапии. Ключевым моментом такой томографии является определение тормозной способности протонов в тканях пациента. В докладе представлена концепция протонного томографа на основе кремниевых пиксельных сенсоров (Монолитные активные пиксельные сенсоры – МАПС), использование которых даёт возможность регистрировать треки и идентифицировать энергию протонов в условиях их высокой интенсивности [1].

Существующие на сегодняшний день методы определения остаточной энергии протона, прошедшего через пациента, предполагают либо прямое измерение энергии (для систем с сцинтилляционными сенсорами), либо определение энергии по пробегу частиц в цифровом калориметре. В докладе рассматривается возможность определения энергии протонов методом оценки множественности кластеров сработавших пикселей МАПС. Приведены экспериментальные результаты по оценке такой множественности для регистрируемых протонов в диапазоне энергий 30-1000 МэВ. Представлена энергетическая зависимость протонов от размеров кластеров пикселей, которая может быть использована для калибровки и прецизионного определения энергетических потерь протонов в тканях пациента с увеличением разрешающей способности методов ПКТ.

Создан прототип трекового детектора для протонного томографа, включающий несколько слоёв детекторов МАПС. По координатам взаимодействия частиц в детектирующих слоях проводится реконструкция треков алгоритмом клеточных автоматов. Это позволяет получить информацию как по координате входа и выхода протона из исследуемого объекта, использующуюся в ПКТ, так и по углу, на который отклонилась частица при прохождении объекта. В связи с этим, обсуждается новый метод получения радиографических изображений по величине угла отклонения протонов. Дано сравнение экспериментально полученных этим методом радиogramм с классическими радиogramмами, основанными на затухании пучка протонов в веществе.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Список источников

1. V. V. Petrov, V. I. Zherebchevsky [et al.], Phys. Part. Nuclei **57**, 393 (2026).

Накопление золошлаковых отходов, выбросов котельного комплекса и рост онкологической заболеваемости

К. А. Петрова*, С. Н. Мамаева, В. Н. Кононов, Э. И. Адышов

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

*e-mail: kristinan_1604@mail.ru

В селе Жиганск Жиганского улуса на протяжении последних лет наблюдается превышение заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) по сравнению со среднереспубликанскими показателями, что позволяет рассматривать данную территорию как зону повышенного онкологического риска. Предположительно, одной из причин сложившейся ситуации является постоянное дополнительное облучение населения продуктами сгорания угля, доставляемого из Сангарского разреза. Ситуация усугубляется тем, что золошлаковые отходы местной котельной длительное время складываются непосредственно на территории посёлка, создавая постоянный источник вторичного загрязнения – источника дополнительного облучения. Для количественной оценки выдвинутого предположения использованы данные радиоэкологических исследований образцов, отобранных на угольных разрезах Якутии (Кангаласский, Харбалахский), а также сведений о фактических объёмах потребления угля и статистических данных о ЗНО в с. Жиганск. В ходе исследования были рассмотрены следующие исходные данные для расчёта дозовых нагрузок: 1) годовое потребление угля в селе – 25 000 тонн; 2) удельная эффективная активность угля – 264,6 Бк/кг; 3) удельная эффективная активность золы – 368,1 Бк/кг; 4) зольность угля – 15% (образуется 3 750 тонн золы в год); 5) доля выброса золы в атмосферу (из-за отсутствия золоуловителей) – 22,5%.

В работе показано, что суммарная активность радионуклидов, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, составляет примерно 310 миллионов Бк/год, а концентрация радионуклидов в приземном слое атмосферного воздуха в зоне влияния котельной достигает $\approx 0,007$ Бк/м³. Кроме того, расчеты показали, что дополнительная эффективная годовая доза облучения для взрослого человека составляет примерно 2,8 мЗв/год и почти в три раза превышает значение этой величины на основе данных Кангаласского разреза (примерно 1,5 мЗв/год) [1].

Согласно действующим нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009), предел дополнительной эффективной дозы для населения от техногенных источников установлен на уровне 1 мЗв/год [2]. Таким образом, расчётное значение превышает гигиенический норматив в 2,8 раза. Полученные данные позволяют предположить наличие корреляции между деятельностью отопительного комплекса (выбросы летучей золы, накопление отходов в черте села) и регистрируемым ростом ЗНО в с. Жиганск. В дальнейшем для подтверждения предположения и снижения рисков необходимо провести измерения радионуклидного состава угля и золы Сангарского разреза, а также проб почвы, растительности, воды, снежного покрова и воздуха в зоне влияния котельного комплекса и золоотвалов; оценить реальный коэффициент выброса золы в атмосферу для местных котельных; рассмотреть вопрос об оснащении котельных системами пылегазоочистки и рекультивации существующих золошлаковых отвалов, расположенных в черте населённого пункта.

Список источников

1. Методические указания МУК 2.6.1.1088-02. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. М. : Минздрав России, 2002. 22 с.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): СанПиН 2.6.1.2523-09. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

Исследование влияния термопластических масок на поверхностную дозу и дозовое распределение в лучевой терапии

Е. Н. Лыкова^{1,2}, Д. Н. Пятаев^{2*}, Чжоу Чжиян¹, А. В. Назаренко², В. И. Жаворонкова¹,
А. П. Черняев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Москва, Россия

*e-mail: pataevdima2@gmail.com

Лучевая терапия является одним из основных методов лечения злокачественных новообразований и применяется более чем у 60–70% онкологических пациентов на различных этапах терапии. Эффективность лучевого лечения определяется точностью подведения предписанной дозы к опухоли при одновременном ограничении дозовой нагрузки на окружающие здоровые ткани и критические органы. Одним из факторов, обеспечивающих воспроизводимость условий облучения, является надежная фиксация пациента. Для этих целей в клинической практике широко используются индивидуальные термопластические маски, обеспечивающие стабильность положения пациента и высокую повторяемость укладки между фракциями, однако их наличие в пучке фотонов может приводить к существенному изменению поверхностной дозы [1–3]. В работе оценивалось влияние термопластических масок различного типа на дозовое распределение при облучении тормозными фотонами с граничной энергией 6 МэВ. Измерения проводились на линейном ускорителе Varian TrueBeam при размере поля 10×10 см² и расстоянии источник–поверхность 90 см; для дозиметрии на поверхности использовалась радиохромная пленка Gafchromic EBT3, размещённая на фантоме из твёрдой воды, а результаты эксперимента были верифицированы с помощью численного моделирования в программном комплексе Geant4.

Сопоставление результатов расчёта с экспериментальными данными, полученными при облучении радиохромных пленок, показало, что разница в значениях прироста поверхностной дозы между двумя методами не превысила 0,8%, что находится в пределах экспериментальной неопределённости. Таким образом, в работе экспериментально и теоретически подтверждено, что термопластическая маска повышает поверхностную дозу. Её присутствие на пути пучка инициирует два взаимосвязанных физических процесса: дополнительную генерацию вторичных электронов в материале маски и нарушение электронного равновесия на границе раздела сред. Эти процессы приводят к увеличению поверхностной дозы в 1,5–2,0 раза по сравнению с облучением без маски, причём величина эффекта зависит от геометрических параметров маски.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости учитывать тип термопластической маски, её толщину и степень перфорации при планировании лучевой терапии, что позволяет более точно прогнозировать дозовую нагрузку на кожу и при необходимости вносить корректировки в план облучения или выбирать более подходящий тип маски.

Список источников

1. L. Gilbeau [et al.], *Radiother. Oncol.* **58**, 155 (2001).
2. L. Sharp [et al.], *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* **61**, 250 (2005).
3. M. Fuss [et al.], *Radiother. Oncol.* **71**, 339 (2004).

Статус проекта по созданию комплекса нейтронной терапии на базе компактного нейтронного генератора НГ-24МТ

В. О. Сабуров^{1*}, А. Н. Соловьев^{1,2}, Е. И. Казаков¹, С. Н. Корякин^{1,2}, С. А. Иванов^{1,4}, А. Д. Каприн^{2,4}

¹Медицинский радиологический научный центр имени А. Ф. Цыба, Обнинск, Россия

²Институт атомной энергии

Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

³Национальный медицинский исследовательский центр радиологии

Минздрава России, Москва, Россия

⁴Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

*e-mail: vosaburov@gmail.com

Нейтронная терапия относится к методам высоко-ЛПЭ лучевой терапии и основана на использовании пучков быстрых нейтронов для лечения злокачественных новообразований. Особенностью нейтронного излучения является формирование вторичных заряженных частиц с высокой плотностью ионизации, что приводит к возникновению сложных и трудно репарируемых повреждений ДНК. Благодаря этому относительная биологическая эффективность (RBE) быстрых нейтронов существенно превышает аналогичный показатель фотонного излучения, что делает нейтронную терапию перспективным методом лечения ряда радиорезистентных опухолей, включая опухоли слюнных желез, саркомы мягких тканей, отдельные формы опухолей головы и шеи и рецидивные новообразования.

Исторически развитие нейтронной терапии было связано с использованием крупных ускорительных комплексов – циклотронов и линейных ускорителей, обеспечивающих генерацию терапевтических нейтронных пучков. Однако высокая стоимость создания и эксплуатации подобных установок ограничила широкое внедрение метода в клиническую практику. Современное развитие ускорительной техники и технологий генерации нейтронов позволяет рассматривать компактные нейтронные генераторы в качестве альтернативной основы для создания специализированных терапевтических комплексов. Одним из таких источников является нейтронный генератор НГ-24МТ, обладающий потенциалом для формирования нейтронных полей, пригодных для проведения радиобиологических исследований и разработки технологий нейтронной терапии [1].

В настоящее время завершается создание комплекса нейтронной терапии на базе компактного нейтронного генератора НГ-24МТ. На данном этапе достигнут поток нейтронов порядка 2×10^{11} н/с, что соответствует требованиям, предъявляемым к установкам для дистанционной нейтронной терапии. Настоящая работа посвящена рассмотрению текущего статуса проекта, достигнутых технических характеристик и основных этапов разработки комплекса.

Список источников

1. Ю. С. Мардынский, И. Ф. Гулидов, К. Б. Гордон [и др.], Вестник РАН **94**(1), 80 (2024).

Особенности вычислительного прогнозирования отклика ионизационных камер для радиотерапевтического применения

А. Н. Соловьев^{1,2}, Я. В. Кизилова^{1,2}, М. С. Шкрабо^{1,3}, А. И. Бровин¹, С. А. Иванов^{1,2}

¹Медицинский радиологический научный центр имени А. Ф. Цыба, Обнинск, Россия

²Институт атомной энергетики

Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск, Россия

e-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru

В настоящее время вопросы соответствия поглощённых доз между планируемыми и фактическими значениями занимают определяющие позиции как элемент обеспечения гарантий качества проводимой лучевой терапии. В свою очередь, ионизационные камеры стали фактически «золотым стандартом» первичных измерений, и используются как на этапах ввода в эксплуатацию новых радиотерапевтических установок и комплексов, так и в рутинной клинической практике. Также они находят применение как элемент комплексной реконструкции данных фактически проводимых лечений в реальном времени на основе пролетных и ряда иных методов. Таким образом, актуальным и целесообразным представляется построение единой математической модели описания реалистичного отклика ионизационных камер, которая обладала бы прогностической силой и могла бы использоваться на самых различных этапах, включая, но не ограничиваясь, фактическое изготовление ионизационных камер; этап первичной калибровкой в эталонных и референсных пучках; обеспечение метрологической прослеживаемости для пучков различного качества, включая пучки протонов, альфа-частиц, более тяжёлых ионов; верификация ожидаемого отклика в ходе рутинной клинической практики, позволяющая быстро выявить нарушения корректности функционирования измерительных трактов. Для решения данной задачи, авторами было разработано специализированное расширение, предназначенное для выполнения как элемент ранее описанного [1] программного комплекса, который позволяет оценивать показатели функционального назначения разнообразных типов и номенклатур ионизационных камер различных производителей. На настоящий момент возможно осуществлять полномасштабное моделирование для камер IBA PPC40, PTW ТМ 30010, 30013, включая этапы оценок фактического стока электронов и ионов на катод и анод в присутствии электромагнитного поля, возникающего из-за разности потенциалов на электродах, число образованных пар в газонаполненной полости камер, водозквивалентную поглощённую дозу в соответствии с теорией Брэгга-Грея. На основе модели возможно проводить разнообразные оценки, включая вычисления коэффициентов полярности, два вида действующих коэффициентов рекомбинации, поправки на температуру и давление газа, при этом для данных задач используется высокоуровневый обработчик на языке Python, на выходе которого создаётся отчёт в виде типовой веб-страницы. В качестве источников на настоящий момент могут быть использованы фазовые пространства в форматах, совместимых с описанием МАГАТЭ (IAEA Phase Space), проведены первичные проверки по валидации модели на основе публично доступных фазовых пространств источников ELDORADO (⁶⁰Co) и Varian Clinac. Подобные модели могут быть широко использованы, помимо радиотерапии, в смежных задачах определения и валидации фактической биологической эффективности пучков [2], а также как ключевой этап ретроспективного моделирования [3].

Список источников

1. A. Solovev, Ya. Kizilova, E. Kazakov, S. Koryakin. Russ. Technol. J. **13**(4), 7(2025).
2. Е. Бекетов и соавт. Радиационная биология. Радиоэкология. **57**(5), 548 (2017).
3. Я. Кизилова [и др.], Радиация и риск. **34**(3), 131 (2025).

Моделирование комбинированного воздействия ионизирующего излучения и озона для стерилизации биоматериалов

А. О. Хуцистова^{1*}, В. В. Розанов^{1,2}, И. В. Матвейчук², А. П. Черняев^{1,3}, Н. А. Николаева⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Всероссийский институт лекарственных и ароматических растений, Москва, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

*e-mail: khutcistova.ao17@physics.msu.ru

Стандартная радиационная стерилизация костных трансплантатов при величине поглощенной дозы 25 кГр обеспечивает микробиологическую безопасность, но снижает биомеханические свойства имплантатов. Кость, как природный наноструктурированный композит с иерархической организацией, требует особых подходов, учитывающих ее архитектуру [1].

Целью работы является разработка модели комбинированной радиационной и химической стерилизации (электронное или рентгеновское излучение в сочетании с кислородом и озоном), которая позволяет количественно оценить распределение биологически эффективной дозы в костной ткани.

Моделирование проводилось с помощью программного пакета GEANT4 с использованием физических библиотек, оптимизированных для работы с низкими энергиями и биологическими тканями. Модель учитывает диффузию газов в структуре кости и синергетический эффект стерилизующего действия кислорода и в комбинации с радиацией.

Результаты моделирования демонстрируют усиление действия кислорода: озон образует высокоактивный бактерицидный барьер на поверхности, в то время как кислород проникает вглубь, повышая радиочувствительность всего объема материала. Такая синергия позволяет значительно снизить радиационное воздействие. Модель количественно подтверждает, что в кислородно-озоновой атмосфере поглощенная доза может быть снижена на 25–40% при сохранении эффективности, стерилизации при радиационной обработке с дозой 25 кГр.

Разработанная модель обеспечивает научную основу для комбинированных технологий стерилизации, которые сохраняют структурную целостность костного матрикса. Этот подход может быть адаптирован к различным типам трансплантатов, открывая новые возможности для регенеративной медицины.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и в рамках Государственного задания, № темы по плану НИР FGUU-2025-0004.

Список источников

1. V. V. Rozanov [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **84**(4), 403 (2020).

Оценка рисков развития радиационно-индуцированных заболеваний при проведении лучевой терапии

А. А. Щербаков^{1,2*}, С. А. Зеленова¹, Е. Н. Лыкова^{1,2}, А. П. Черняев^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: sherbakov.aa15@physics.msu.ru

В настоящее время технологии проведения процедур лучевого лечения развиваются и совершенствуются. По данным исследований, если в 1930-е годы лишь 5% пациентов проживали 5 и более лет после лечения, то на сегодняшний день это значение превышает 80%, а по отдельным локализациям и 95%. В то же время появилась возможность длительно наблюдать пациентов после проведения лучевого лечения.

Согласно представленным в литературе данным, вместе с продолжительностью жизни пациентов растет и число выявленных отдаленных последствий лучевого лечения. Такие последствия проявляются через годы и десятилетия после лечения. Анализ исследований радиационно-индуцированных заболеваний показывает, что основными физическими факторами развития данных заболеваний являются величина и распределение дозы в тканях пациента [1]. Таким образом, важной задачей становится контроль за факторами возможных неучтенных доз на всех этапах лучевого лечения.

К таким факторам могут относиться геометрические искажения КТ- и МР-снимков [2], не учитываемые при планировании вторичные нейтроны [3], возникающие в результате фото-ядерных реакций в головке медицинского линейного ускорителя, рассеянное излучение и утечки электронов через многолепестковые коллиматоры ускорителей [4], [5]. Эти и другие факторы приводят к отклонениям получаемой пациентом дозовой нагрузки от рассчитанной в системах планирования.

В представленной работе предлагается подход по учету нескольких наиболее исследованных факторов неопределенностей для расчета рисков радиационно-индуцированных заболеваний у пациентов, прошедших процедуру лучевого лечения предстательной железы. Данная локализация выбрана, потому что для нее сочетаются все рассмотренные факторы неопределенностей (использование МРТ для планирования, использование высоких энергий тормозного излучения для полных пациентов, использование МЛК). В качестве органов риска рассматривались прямая кишка, мочевой пузырь и головки бедренных костей. Риски оценивались в соответствии с линейной моделью без порога (LNT), линейно-квадратичной моделью оценки рисков (LQ), а также механистической моделью оценки рисков Шнайдера [6]. Для каждого органа риска рассчитаны значения рисков по каждой модели с учетом и без учета всех выявленных неопределенностей.

Список источников

1. А. А. Щербаков [и др.], Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. **80**(5), 2550701. 2025.
2. Е. Н. Лыкова [и др.], Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. **79**(4), 2440703. (2024).
3. А. Chernyaev [и др.], Quantum Beam Science. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). **7**(3), (2023).
4. А. П. Черняев, Е. Н. Лыкова, А. А. Щербаков Российские нанотехнологии. **18**(4), 540 (2023).
5. Е. Н. Лыкова [и др.] Исследование пропускания дозы в многолепестковом коллиматоре на ускорителе VARIAN HALCYON. **86**, 557 (2022).
6. U. Schneider, B. Kaser-Hotz, Radiat. Environ. Biophys. Radiat Environ Biophys. **44**(3), 235 (2005).

Ядерные реакции на кислороде, углероде, азоте и боре при облучении протонным пучком 160 МэВ

М. Н. Юсупов, Ч. Линь, М. В. Желтоножская, А. П. Черняев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: ymirjalol@bk.ru

Протонная терапия, обеспечивающая высокий градиент дозы благодаря пику Брэгга и позволяющая минимизировать лучевую нагрузку на здоровые ткани, занимает всё более значимое место в лечении онкологических заболеваний, особенно в случаях глубоко залегающих и радиорезистентных опухолей. Однако при облучении тканей пучками протонов терапевтического диапазона энергий (70–250 МэВ) в ядерных реакциях на кислороде, углероде и азоте образуется целый ряд позитрон-излучающих нуклидов, а экспериментальные данные о сечениях этих реакций и о создаваемой ими дополнительной дозе вблизи пика Брэгга до сих пор остаются крайне ограниченными.

В представленной работе исследовалось образование радиоактивных нуклидов при облучении протонами с энергией 160 МэВ мишеней оксида бора (B_2O_3), нитрида бора (BN), карбида бора (B_4C) и бора (B) естественного состава, поскольку прямое облучение газообразных мишеней кислорода, азота и углерода технически затруднено, а бор, выступая в роли удобной матрицы, вносит значительно меньший вклад в ядерные реакции, чем исследуемые элементы O, C и N. Облучение мишеней проводилось на синхротронном ускорителе комплекса протонной терапии «Прометеус». Облученные мишени пересыпались в чашки Петри и измерялись на сцинтилляционных спектрометрах CsI(Tl) с энергетическим разрешением 6,9%. Измерения позитронной активности проводились по аннигиляционному пику 511 кэВ сериями с последовательной регистрацией гамма-спектров во времени, что позволило разделить вклады радионуклидов по их периодам полураспада. В гамма-спектрах облучённых мишеней после вычитания вклада реакций на боре были определены активности следующих позитрон-излучающих радионуклидов: ^{15}O ($T_{1/2}=2$ мин), ^{11}C ($T_{1/2}=20,4$ мин), ^{13}N ($T_{1/2}=10$ мин), образующихся в (p,xn) (p,xrxn) реакциях на кислороде, углероде и азоте. Активность долгоживущего ^7Be ($T_{1/2}=53$ дн) в облученных мишенях определялась по гамма-линии 477 кэВ в условиях низкофоновой лаборатории на полупроводниковом спектрометре с детектором из сверхчистого германия.

Доля активности ^{13}N в полной β^+ -активности мишеней кислорода и углерода сразу после облучения не превышала 10%, основной вклад в суммарную позитронную активность мишени кислорода внесли практически поровну ^{15}O и ^{11}C , а в мишени углерода доминировала активность ^{11}C . Из полученных данных о выходе активности были рассчитаны экспериментальные сечения ядерных реакций, которые сравнивались с теоретическими расчётами, выполненными в рамках модели внутриядерного каскада INCL и в рамках каскадно-испарительных моделей с использованием кода TALYS 2.2. Полученные результаты обсуждаются.

Расчет характеристик черенковского детектора для контроля пучков протонов, используемых для флэш-терапии

И. А. Яковлев^{1,2*}, С. В. Акулиничев^{1,2}, Ю. К. Гаврилов¹, Р. М. Джилкибаев¹

¹Институт ядерных исследований РАН, Троицк–Москва, Россия

²Российский научный центр хирургии имени Б. В. Петровского, Москва, Россия

*e-mail: iv.a.yakovlev@gmail.com

Развитие протонной FLASH-терапии, использующей пучки со сверхвысокой мощностью дозы, стимулирует разработку детекторов, пригодных для мониторинга больших импульсных токов.[1] Проведенные на ускорителе протонов ИЯИ РАН эксперименты [2] показали высокую линейность отклика в широком диапазоне токов нового детектора, регистрирующего световое излучение в тонком стеклянном радиаторе. Исследование временных характеристик сигналов этого детектора показало доминирование в этих сигналах черенковского излучения вторичных электронов. В данной работе с использованием кода GEANT4 [3] проведен расчетный анализ свойств данного детектора с целью его дальнейшего внедрения на установках протонной флэш-терапии. Исследованы параметры отклика прибора в зависимости от энергии падающего пучка, а также установлена линейная связь между откликом детектора и дозой в области пика Брэгга, что позволяет использовать прибор для косвенного контроля дозовых распределений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-15-00040 «Разработка ядерно-физических и радиобиологических методов протонной флэш-терапии».

Список источников

1. S. V. Akulinichev [et al.], Bull. RAS. Phys. **87**(8), 1242 (2023).
2. S. V. Akulinichev, Y. K. Gavrilov, R. M. Djilkibaev, JINST. **19**, 12025 (2024).
3. S. Agostinelli [et al.], Nucl. Instrum. Meth. A. **506**(3), 250 (2003).

Стеновые доклады

Poster Section

Моделирование и измерение параметров дрейфа электронов в активной мишени

А. Аламури^{1*}, А. А. Дзюба^{1,2}, А. В. Добровольский², А. Д. Чубыкин²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

*e-mail: st123089@student.spbu.ru

Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ обладает значительным научным заделом в области экспериментов с применением метода активной мишени [1–2]. Активная мишень на основе время-проекционной камеры (ВПК) является одновременно газовой мишенью для электронного пучка и детектором вторичных частиц. В рамках планируемой работы предлагается выполнить серию экспериментов по измерению дифференциальных сечений реакций выбивания протонов и кластеров (дейтронов и ядер гелия) из различных газовых сред (He, CH₄, N₂, Ar). Для реализации данной научной программы в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется разработка специализированной ВПК. Подготовка эксперимента включает детальное GEANT4-моделирование установки, анализ влияния собственных электронных шумов и наводок от электронного пучка на угловое и энергетическое разрешение [3], а также создание алгоритма идентификации типа частиц отдачи, основанный на моделировании и использовании статистического критерия χ^2 [4]. Эффективность регистрации во многом определяется процессами, происходящими во время дрейфа электронов ионизации. С помощью программы COMSOL в осесимметричной геометрии рассчитано распределение потенциала и построены силовые линии поля. Анализ силовых линий позволил не только определить длину пути дрейфа, но и количественно оценить область допустимой работы детектора, свободную от краевых эффектов. Эти расчеты подтверждены измерением сигналов от альфа-источников, расположенных внутри камеры. Для различных газовых сред (Ar, He, H₂, N₂) с помощью программ Magboltz, входящей в программный пакет Garfield++, определены скорости дрейфа, а также коэффициенты продольной и поперечной диффузии. Выяснено, что продольное и поперечное уширения электронного облака слабо зависят от радиуса чувствительной области ВПК, но монотонно растут с увеличением длины пути дрейфа. Также учтено прилипание электронов к примесям O₂: доля «выживших» электронов экспоненциально падает с ростом концентрации кислорода. Рассчитана не-экранировка сетки (проницаемость), где наведенный на анод положительный заряд, возникающий в промежутке катод-сетка, уменьшает сигнал на аноде [5]. Например, для типичной геометрии (диаметр проволоочки 0,1 мм, шаг 1,5 мм, расстояние сетка–анод 10 мм) проницаемость составляет 3,6%, что ослабляет сигнал. Все вышеупомянутые эффекты необходимо включить в программу моделирования ВПК. Кроме того, был предложен метод измерения скорости дрейфа электронов с использованием сигналов от мюонов космического излучения.

Список источников

1. J. P. Burq [et al.], Nucl. Phys. B **217**, 285 (1983).
2. G.D. Alkhazov [et al.], Phys. Part. Nucl. **53**, 661 (2022).
3. A. Alamouri, A. A. Dzyuba, Open Science. Abstract Book, Gatchina, **159** (2024).
4. A. H. Alamouri, A. A. Dzyuba, Phys. Part. Nucl. **57**, 249 (2026).
5. O. Buneman, T. E. Cranshaw, J. A. Harvey, Can. J. Res. A **27**, 191 (1949).

Channeling radiation as a tool for GDR excitation in Yttrium

N. A. Ashurko*, O. V. Bogdanov, Y. Wang*

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

*e-mail: ashurko@tpu.ru, *yanchzhao1@tpu.ru

The study of collective nuclear excitations, such as the giant dipole resonance (GDR) [1], remains highly relevant. Of particular interest is the application of channeling radiation (CR) from electrons in crystals as a novel method for investigating photonuclear reactions. Numerical calculations [2] have shown that GDR excitation by CR gamma photons is a more efficient and cost-effective approach compared to the conventional method based on bremsstrahlung.

Radioactive isotopes of yttrium are important in nuclear medicine due to their theranostic pair: diagnostic and therapeutic isotopes with identical chemical properties enable personalized treatment with preliminary dosimetry assessment, making them indispensable in oncology.

In this work, we present the results of a study on GDR excitation in yttrium nuclei using radiation produced during the channeling of relativistic electrons in crystals. Numerical calculations of the total GDR yield in the (γ, n) and $(\gamma, 2n)$ photonuclear reactions are presented. It is shown that this method can offer advantages over the conventional BS-based approach and can serve as a pulsed neutron source with controllable parameters.

Список источников

1. M. N. Harakeh, A. Woude, Oxford Studies in Nuclear Phys. **24** (2001).
2. N. A. Ashurko, O. V. Bogdanov, S. B. Dabagov, Eur. Phys. J. A **61**(12), 276 (2025).

Методы раннего обнаружения аномалий в радионуклидных выбросах АЭС на основе статистик многолетнего мониторинга

А.-Н. В. Вуколова*, А. Н. Пекшев, С. В. Семёнов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: vukolova_av@nrcki.ru

Представлены результаты разработки и апробации набора индикаторов раннего обнаружения аномалий в радионуклидных выбросах атомных электростанций на основе многолетних рядов данных из европейской базы Radioactive Discharges Database (RADD), формируемой Еврокомиссией в соответствии с рекомендациями EURATOM по стандартизированной отчётности по выбросам [1]. В качестве исходной информации использованы ежегодные суммарные выбросы по основным радионуклидам для ряда европейских АЭС разных типов и стран, извлечённые из RADD и агрегированные в единую техническую таблицу с расчётом ключевых статистик стабильности и тренда для каждой площадки. Для каждого временного ряда выбросов рассчитывались коэффициент вариации (CV) и робастный коэффициент вариации, отношение годового максимума к среднему (max/mean), показатель нестабильности U и нормированное отношение U/Ss, а также параметры линейного тренда (наклон и p-value) и непараметрические ранговые критерии Спирмена и Кендалла. На основе комбинации этих показателей предложен простой интегральный «индекс аномальности» интервала наблюдений, учитывающий высокий разброс (CV и robust CV выше заданных порогов), наличие экстремальных значений (max/mean >> 1) и статистически значимый монотонный тренд по результатам ранговых тестов, а также автоматически формируемые диагностические флаги (наличие IQR-выбросов и малое число лет в интервале). Проведён сравнительный анализ распределения значений индекса аномальности для площадок с различными типами реакторов и различными национальными практиками эксплуатации и мониторинга, а также сопоставление с результатами традиционных радиоэкологических оценок по отечественным и международным публикациям [4–7]. Показано, что использование совокупности простых статистических индикаторов на основе данных RADD позволяет выделять интервалы со статистически нестабильным поведением выбросов, потенциально требующие углублённого экспертного анализа, и может рассматриваться как элемент риск-ориентированного подхода к надзору за радиационной безопасностью АЭС в условиях широкого применения открытых баз данных мониторинга.

Список источников

1. European Commission, European data portal for radioactivity in the environment, Publ. Off. Eur. Union, Luxembourg (2016).
2. IAEA, Now Available: Upgraded IAEA Database on Discharges of Radionuclides from Nuclear Installations (DIRATA), IAEA, Vienna (2023).
3. Г. Г. Онищенко, А. Ю. Попова, И. К. Романович [и др.], Радиационная гигиена **14**(1), 6 (2021).
4. Р. М. Алексахин, Мед. радиология и радиационная безопасность **60**(5), 25 (2015).
5. В. К. Кузнецов, П. Н. Цыгвинцев, Н. И. Санжарова, А. В. Панов, Радиация и риск **30**(2), 89 (2021).
6. A. Ueda [et al.], Environ. Sci.: Processes Impacts. **22**, 1372 (2020).
7. T. Kinase [et al.], Sci. Rep. **10**, 21627 (2020).
8. И. И. Линге, И. И. Крышев, ред., Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», 2-е изд., испр. и доп., ИБРАЭ РАН, М. 2021.

Результаты измерения дифференциального сечения образования мгновенных гамма-квантов в реакциях быстрых нейтронов с ядрами титана

В. В. Гаганов

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия
e-mail: gaganov@expd.vniief.ru

Представлены результаты измерения дифференциального сечения образования мгновенных гамма-квантов в неупругих взаимодействиях 14,5 МэВ нейтронов с ядрами титана. Измерения проведены в редакции интегральных экспериментов методом времени пролета на нейтронном генераторе, работающем в импульсном режиме, с использованием однокристалльного гамма-спектрометра со сцинтиллятором NaI(Tl) диаметром 15 см и высотой 10 см [1]. Исследуемый образец из титана естественного изотопного состава имел форму полусферического слоя с внешним диаметром 27 см и весом 13 кг. Измеренные сечения представлены в диапазоне энергий гамма-квантов от 0,5 МэВ до 13 МэВ на сетке с шагом 0,25 МэВ. Выполнено сравнение полученных данных с результатами других экспериментов и с оцененными сечениями из библиотек ENDF/B-V, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII.0.

Список источников

1. А. Е. Шмаров, В. В. Гаганов, А. Г. Малькин, ВАНТ. Серия: Теоретическая и прикладная физика. 1, 17 (2023).

Результаты моделирования эксперимента по исследованию фотоядерных реакций на источнике комптоновского излучения

А. В. Долгополов^{1,2*}, В. В. Гаганов¹, А. А. Кузнецов³

¹Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
филиал в г. Сарове, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелыцина
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: dolgopolov211@mail.ru

Исследование тонкой структуры гигантского дипольного резонанса является актуальной задачей, для решения которой необходимы высокоинтенсивные источники моноэнергетических фотонов. В связи с этим в последние годы разрабатываются источники моноэнергетических фотонов – источники комптоновского излучения (ИКИ) [1], [2], основанные на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов лазера на релятивистских электронах.

В результате фотоядерных реакций под воздействием фотонов от ИКИ в исследуемой мишени образуются быстрые нейтроны, измерение энергетического спектра которых позволит уточнить сечение фотоядерных реакций, структуру ядер и используемые модели расчетов.

В настоящей работе для планируемых экспериментов на ИКИ выполнено моделирование фотоядерных реакций методом Монте Карло в Geant4, PHITS, C-007. Представлены результаты расчетов энергетических спектров быстрых нейтронов, образующихся в мишенях ^{208}Pb и ^{197}Au . Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [3].

Список источников

1. Л. В. Григоренко, Н. В. Антоненко, И. А. Артюков [и др.], Физмат. **1**(34), 123 (2024).
2. А. М. Лапик, С. С. Белышев, В. В. Варламов [и др.], Известия РАН. Серия физическая, **88**(8), 1171 (2024).
3. N. K. Sherman, H. M. Ferdinande, K. H. Lokan, C. K. Ross, Phys. Rev. Lett. **35**, 1215 (1975).

**Детектор импульсного ионизирующего излучения
с субнаносекундным временным разрешением
на основе радиационно-наведенного поглощения света в лейкосапфире**

А. Е. Дормидонов*, В. А. Симонова, Е. Д. Залозная, А. Д. Саввин

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

*e-mail: dormidonov@gmail.com

Для измерения импульсного рентгеновского излучения мощных линейных ускорителей и синхротронов необходимы детекторы с высокими временным разрешением, радиационной стойкостью и ресурсом. Как правило для этих целей используются детекторы на основе первичного преобразователя – сцинтиллятора, черенковского радиатора и др., в котором происходит преобразование ионизирующего излучения в оптическое, и фотоприемного устройства – фотоэлемента или фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Высоковольтные электромагнитные наводки от генерирующего ионизирующее излучение установок, воздействуют на информационные электрические кабели, соединяющие ФЭУ с низковольтным цифровым регистратором, что может приводить к существенным искажениям регистрируемых сигналов. В данной работе представлен детектор импульсного ионизирующего излучения с субнаносекундным временным разрешением на основе радиационно-наведенного поглощения света в лейкосапфире. Принципиально новая схема построения предлагаемого детектора заключается в просвете лейкосапфира непрерывным лазерным излучением, что при использовании оптического волокна позволяет разместить лазерный излучатель и цифровой регистратор прошедшего света на большом расстоянии от чувствительного элемента и исключить влияние электромагнитных помех. При поглощении ионизирующего излучения в лейкосапфире образуются быстро рекомбинирующие свободные заряды, концентрация которых пропорциональна плотности потока воздействующего импульса. Возникновение свободных зарядов приводит к помутнению лейкосапфира на короткий промежуток времени (~ 100 пс), что регистрируется по изменению мощности зондирующего излучения. Представленный детектор ионизирующего излучения имеет временное разрешение ~ 100 пс, диапазон изменения чувствительности к рентгеновскому и γ -излучению соответствует возможности регистрации ионизирующего излучения с плотностями потоков от 10^{19} квант/см²·с.

Поиск распадов с нарушением принципа Паули и барионного числа с помощью детектора Бorexино

А. В. Дербин, И. С. Драчнев*, Д. В. Иванов, В. Н. Муратова, М. А. Панкратов,
Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

*e-mail: drachnev_is@pnpi.nrcki.ru

Нейтринный детектор Бorexино – уникальный сверхнизкофоновый детектор, предназначенный для регистрации и анализа спектра солнечных нейтрино [1]. Для решения этой задачи он имеет достаточно большой объем сцинтиллятора в центральной части детектора с высочайшей степенью очистки от источников фоновой радиоактивности. Такой детектор может вполне успешно использоваться для поиска сигналов всевозможных редких процессов, протекающих с излучением частиц с энергиями, находящимися в области энергий солнечных нейтрино, а именно 0,2–20 МэВ.

В данной работе был произведён поиск нестандартных ядерных превращений с использованием детектора Бorexино, а именно – поиск распадов ядра ^{12}C с нарушением принципа Паули [2] и распадов в так называемый «невидимый» канал, происходящих с нарушением барионного числа [3]. Эти эффекты в спектре детектора не обнаружены, в результате установлены новые ограничения на время жизни ядра ^{12}C относительно данных процессов.

Новые ограничения на распад с нарушением принципа Паули составили:

$$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^* + \gamma \text{ (16,4 МэВ): } \tau \geq 9,7 \times 10^{31} \text{ лет}$$

$$^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^* + e^- + \nu_e \text{ (18,9 МэВ): } \tau \geq 1,2 \times 10^{31} \text{ лет}$$

$$^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^* + p \text{ (8,6 МэВ): } \tau \geq 2,7 \times 10^{30} \text{ лет}$$

Новые ограничения на время жизни относительно распадов в невидимый канал с нарушением барионного числа составили:

$$^{12}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} : \tau \geq 1,28 \times 10^{30} \text{ лет}$$

$$^{12}\text{C} \rightarrow ^9\text{Li} : \tau \geq 7,44 \times 10^{28} \text{ лет}$$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-12-00046.

Список источников

1. G. Bellini, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **74**, 369 (2024).
2. G. Bellini [et al. Borexino coll.], Phys. Rev. C **81**, 034317 (2010).
3. H. Back [et al. Borexino coll.], Phys. Lett. B **563**, 23 (2003).

Расчёт сечений образования изомера серебра ^{108m}Ag в (d,p) реакциях на ускорителе ЭГП-10

Е. Д. Дружинин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
филиал в г. Сарове, Россия
e-mail: druzh2003@mail.ru

В настоящее время ядерная изомерия представляет большой интерес и является одним из ключевых направлений физики атомного ядра благодаря теоретической возможности создания компактных источников энергии на основе долгоживущих возбуждённых состояний в будущем [1]. Среди таких изомеров особый интерес представляет ^{108m}Ag ($E_{\text{isom}} = 109,5$ кэВ, $T_{1/2} \approx 438$ лет, $J^P = 6^+$). Цель данной работы – оценка возможности наработки ^{108m}Ag в реакции $^{107}\text{Ag}(d,p)^{108}\text{Ag}$ с использованием программного пакета Talys 2.2, последующего анализа пробегов дейтронов и выхода изомера.

Моделирование проводилось в Talys 2.2 [2] для энергий дейтронов от 2 до 10 МэВ. Подбор оптических потенциалов для дейтронов и моделей реакции распада выполнялся путём верификации с экспериментальными данными EXFOR [3] для близких реакций $^{109}\text{Ag}(d,p)^{110}\text{Ag}$ и $^{114}\text{Cd}(d,p)^{115}\text{Cd}$. Наилучшее согласие достигнуто для оптической модели OMP1 совместно с моделью распада Avrigeanu. Для выбранного набора параметров сечение образования изомера ^{108m}Ag при энергии дейтронов 8–10 МэВ составляет ≈ 53 мбарн. Пробег дейтронов с энергией 10 МэВ в серебре, рассчитанный в SRIM-2013, составляет в среднем 163 мкм (максимум 170 мкм), что позволяет выбрать толщину мишени около 200 мкм. При токе пучка 1 мкА скорость наработки изомера достигает $0,39 \cdot 10^9$ атомов/с, что соответствует $\approx 2,5 \cdot 10^{-10}$ г/час.

Помимо этого, была рассмотрена работа 1972 года [4], где представлены угловые распределения и спектр протонов при облучении ^{107}Ag дейтронами, на которых отчётливо наблюдается пик при 79 кэВ, который соответствует переходу ^{108m}Ag с изомерного на основное состояние, что показывает наличие изомера в эксперименте. Анализ конкурирующих каналов $^{107}\text{Ag}(d,*)$ показал, что оптимальной с точки зрения относительного выхода изомера является энергия дейтронов 6.7 МэВ (доля изомерного канала 21.8%, сечение 39,4 мбарн), тогда как при 10 МэВ достигается максимальное абсолютное сечение, но возрастает вклад побочных процессов (d,n) и (d,2n). Расчёт активности продуктов облучения показал, что при энергии 6,7 МэВ основной вклад вносят ^{108m}Ag , ^{108}Ag и ^{107}Cd , тогда как ^{106}Ag и ^{109}Cd практически отсутствуют. Благодаря большому периоду полураспада изомера его активность становится выше по сравнению с другими продуктами реакции. Таким образом, показана принципиальная возможность получения ^{108m}Ag на ускорителе ЭГП-10, однако для наработки изомера в значительных количествах данный способ не применим. В дальнейшем будет проведён эксперимент по верификации полученных данных.

Список источников

1. С. А. Карамян. ЭЧАЯ **39**(4), (2008).
2. A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely, TALYS-2.2: Simulation of Nuclear Reactions. Vienna, IAEA, 879 p. (2025).
3. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. URL: <https://www-nds.iaea.org/exfor/>.
4. C. E. Briant, P. J. Riley, H. Seitz, S. Sen, Physical Review C. **6**(6) (1972).

Квазиклассическое описание поведения малого числа тел для адронов и темной материи

А. Т. Дьяченко^{1,2*}, Т. К. Кург²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

²Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dyachenko_a@mail.ru

В квазиклассическом боровском приближении мы подошли к задаче адронной физики, где потенциал взаимодействия на расстоянии r составных кварков может быть выбран в форме потенциала Корнелла [1], содержащего притягивающий член br (натяжение струны для кварков) и КХД член $\frac{a}{r}$. Параметры полуфеноменологического корнелльского потенциала a и b недостаточно хорошо определены. Во многих работах [1–3]) они определяются зачастую подгонкой для мезонных резонансов (двухчастичная задача). В данной работе мы определили эти два параметра из двух уравнений для выражений масс пиона и протона, массы и радиусы которых известны. Выражения для масс с учетом релятивистского движения составных кварков получились квазиклассические, но при этом удалось обойти проблему релятивистской квантовой задачи двух и трех тел [3], [4]. С помощью найденных нами параметров потенциала Корнелла мы определили массы и радиусы мезонных резонансов. Мы также нашли приближенные выражения волновых функций для спектра тяжелого Ψ кваркония, состоящего из c и анти c кварков. Такое независимое определение параметров потенциала Корнелла имеет важное значение для адронной спектроскопии и проблемы, связанной с достижением критической точки для кварк-глюонной плазмы, при построении моделей тетракварков и пентакварков. Модель атома гелия может пригодиться в поиске темных атомов гелия [5], а также в обнаружении новых частиц-кандидатов на роль частиц темной материи [6], [7]. Используя в предложенном нами методе найденные нами параметры a и b в потенциале Корнелла, перенормированные с учетом электромагнитной константы связи $1/137$, мы получили массу бозона $X17$ (17 МэВ), состоящего из двух легких кварков, – новой частицы – темного мезона, найденного в работах [6–8] и исследованного нами ранее [8] в модели трубки при объединении двумерных КХД и КЭД. Здесь в нашем подходе получено независимое подтверждение массы $X17$, равной 16,7 МэВ, и его радиуса (2.1 фм), а также указаны характеристики другой, еще пока не открытой новой частицы $X38$.

Список источников

1. А. И. Вайнштейн, М. Б. Волошин, В. И. Захаров [и др.], УФН **123**, 217 (1977).
2. А. А. Быков, И. Н. Дремин, А. В. Леонидов, УФН. **143**, 3 (1984).
3. М. Н. Сергеевко, Proc. Nat. Acad. Sci. Belarus. Phys. and Math. **57**, 46 (2021).
4. I. T. Todorov, Ann. Inst. H. Poincaré. A **28**, 207 (1978).
5. Т. Е. Bikbaev, М. Yu. Khlopov, А. G. Mayorov. arXiv:2502.12407v1 [hep-ph].
6. А. J. Kraznahorkay [et al.], Phys. Rev. Lett. **116**, 042501 (2016).
7. М. В. Архипов, А.Т. Дьяченко, Письма в ЖТФ **50**(23), 11 (2024).
8. А. Т. Дьяченко, ЯФ. **86**, 259 (2023).

Fluctuations and correlations in relativistic nucleus–nucleus collisions

S. A. Ibraimova*, I. A. Lebedev

Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: sayara_ibraimova@mail.ru

A joint study of multi-particle pseudo-rapidity correlations and event-by-event fluctuations in the distributions of secondary particles and fragments of the target nucleus and the projectile nucleus was carried out in order to search for correlated clusters of secondary particles. An analysis of the collisions of the sulfur nucleus with photoemulsion nuclei at an energy of $200 \text{ A} \cdot \text{GeV}$ is presented based on experimental data obtained at the SPS at CERN. The analysis of multi-particle correlations was performed using the Hurst method. A detailed analysis of each individual event showed that in events of complete destruction of a projectile nucleus with a high multiplicity of secondary particles, long-distance multi-particle pseudo-rapidity correlations are observed. The distribution of average pseudo-rapidity in such events differs significantly from others, as it is much narrower, and its average value is noticeably shifted towards lower values average pseudo-rapidity.

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23487706).

References

1. A. Fedosimova [et al.], *Particles*. **7**, 4 (2024).
2. K. Olimov [et al.], *Universe* **8**, 8 (2022).
3. S. Ibraimova [et al.], *Phys. At. Nucl. E* **88**(5) (2025).

Применение микроконтроллерных и микрокомпьютерных систем в измерительных комплексах на базе стандарта КАМАК

Л. В. Титова, В. В. Дьячков*

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: diachkov@phys.vsu.ru

В ускоряющемся росте таких технологических решений, как микропроцессорная техника, неминуемо влечет за собой увеличение объема и скорости передачи информации по вновь созданным протоколам передачи данных. Существующие электронные измерительные комплексы и системы, которые хорошо зарекомендовали себя, перестают быть эффективными. Однако, такие комплексы и системы имеют богатый функциональный набор различных измерительных модулей, которые необходимы и для новых микропроцессорных передовых систем. В настоящей работе была разработана концепция сочленения микроконтроллеров ATmega и микропроцессоров ARM, использующие современные протоколы передачи данных, со старыми стандартами измерительных систем на базе стандарта КАМАК. Реализована передача данных и взаимодействие между разработанными программируемыми модулями по современным протоколам, используя внутреннюю шину управления системы КАМАК. Такие нововведения позволили существенно увеличить и расширить возможности модулей старого поколения как, например, спектрометрические усилители в тандеме с разработанными много-разрядными и быстродействующими аналого-цифровыми преобразователями на базе современных микропроцессорных систем. Авторами были разработаны: программируемый модуль АЦП для спектрометрической системы; программируемый модуль генерации импульсных спектрометрических сигналов (ГИСС), который позволяет формировать импульсы, имитирующие сигналы с детектора от различных радионуклидов; программируемый модуль высокого напряжения, который формирует на выходе высокое напряжение от 0 до 1,5 кВ для питания сцинтилляционных детекторов; программируемый модуль сбора и хранения данных на базе процессора ARM (анализатор спектра), с помощью которого можно управлять другими разработанными модулями удаленно по локальной сети. Конструктивно все модули выполнены в форм-факторе стандарта КАМАК, имеющие стандартную форму, 86-контактный разъём и крепления, помещаемую в крейт. Каждый из модулей на передней панели имеет USB-порт для возможности его программирования или обмена данными с ПК.

Авторами был разработан комплекс лабораторных работ [1] на основе программируемых модулей по изучению основных характеристик спектрометрических систем. В настоящее время внедряется в учебный процесс по дисциплине «Ядерная электроника» для студентов магистратуры, обучающихся по направлению 14.04.02 «Ядерная физика и технологии» на кафедре ядерной физики физического факультета ВГУ.

Список источников

1. Л. В. Титова, В. В. Дьячков, Микрокомпьютерная и микроконтроллерная модульная спектрометрическая система измерительного комплекса КАМАК: лабораторный практикум : учебное пособие, Воронеж : ВГУ, 2026. 121 с.

Estimated $B(E2)$ values for neutron-rich actinide nuclei

A. D. Efimov^{1,2*}, I. V. Koval¹, H. M. Devaraja³, I. N. Izosimov³

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

²Physical-Technical Institute Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: efimov98@mail.ru

In even–even nuclei of this region, the $B_w(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ values were calculated within the self-consistent nuclear mean-field model and compared with experimental data. This shows that the calculations have good predictive power for as-yet-unmeasured transition probabilities. The calculations were performed using density functional theory (DFT) – UDF1m [1] within the Hartree–Fock–Bogolyubov (HFB) method. The corresponding results are presented in the table together with the available experimental data.

Th			U			Pu			Cm		
N	Exp.	Theor.	N	Exp.	Theor.	N	Exp.	Theor.	N	Exp.	Theor.
142	198(11)	204	144	248(8)	256	144		289	144	250(230)	320
144	183(16)	223	146	281(4)	268	146	287(11)	299	146		328
146		237	148		274	148	301(14)	303	148	419(23)	332
148		245	150		274	150	300(30)	302	150	326(8)	330
150		246	152		276	152		297	152	324(4)	325
			154		259	154		286	154		316
						156		274	156		302

Since the considered atomic nuclei are well deformed, the following estimates $B(E2; I+2 \rightarrow I) = \frac{15}{2} \frac{(I+2)(I+1)}{(2I+5)(2I+3)} B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ can be applied to them up to certain spins in the ground-state band. Together with the transition energies, this allows one to estimate the intensities of the corresponding transitions. It should also be noted that the obtained estimates for $B(E2)$ can be used as reference points in calculations within other theoretical approaches.

References

1. J. Dobaczewski, P. Baczyk, P. Becker, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **48**, 102001 (2021).

Binding energy estimates for even-even actinide nuclei

A. D. Efimov^{1,2*}, I. V. Koval¹, H. M. Devaraja³, I. N. Izosimov³

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

²Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

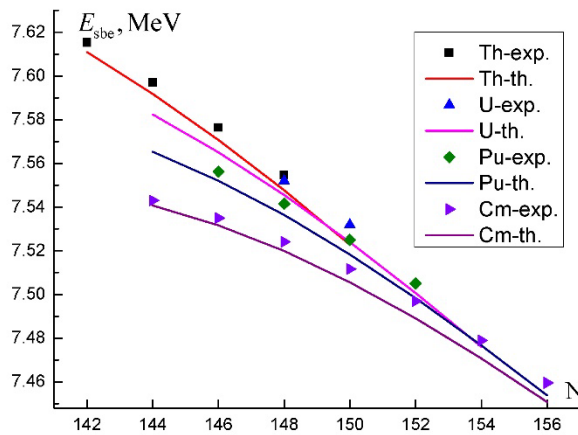
³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: efimov98@mail.ru

Systematic studies of neutron-rich actinide and transactinide nuclei are essential for exploring the limits of nuclear stability and the formation of the heaviest elements. Based on experimental results and theoretical predictions, multinucleon transfer (MNT) reactions offer a feasible approach to reach these neutron-rich regions [1], [2], which are largely inaccessible using standard fusion evaporation methods. However, the simultaneous production of many reaction products in MNT reactions makes the unambiguous identification of individual isotopes experimentally challenging. Decay spectroscopy alone is often insufficient for reliable isotope assignment. Direct mass measurements using mass spectrometry methods therefore play a crucial complementary role.

In this context, reliable predictions of nuclear binding energies are essential to support the mass spectrometry identification methods. For this purpose, both approximations and theoretical calculations of nuclear binding energies can be employed. In this work, we present results for even-even

nuclei obtained within the self-consistent nuclear mean-field framework using the Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) method with density functional theory (DFT), as implemented in the HFODD code~[3]. The figure shows specific binding energies as a function of neutron number for isotopes of Th, U, Pu, and Cm, comparing experimental and calculated values. Even the discrepancy between these quantities can be used to provide a more accurate estimate of the yet unmeasured binding energy for a nucleus of interest.



References

1. S. Heinz, H. M. Devaraja, Eur. Phys. J. A **58**, 114(2022).
2. H. M. Devaraja [et al.], Phys. Lett. B **862**, 139353 (2025).
3. J. Dobaczewski, P. Baczyk, P. Becker, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **48**, 102001 (2021).

Evolution of the neutron shell gap for $N \geq 150$ with increasing Z from 89 to 100

A. D. Efimov^{1,2*}, I. V. Koval¹, H. M. Devaraja³, I. N. Izosimov³

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

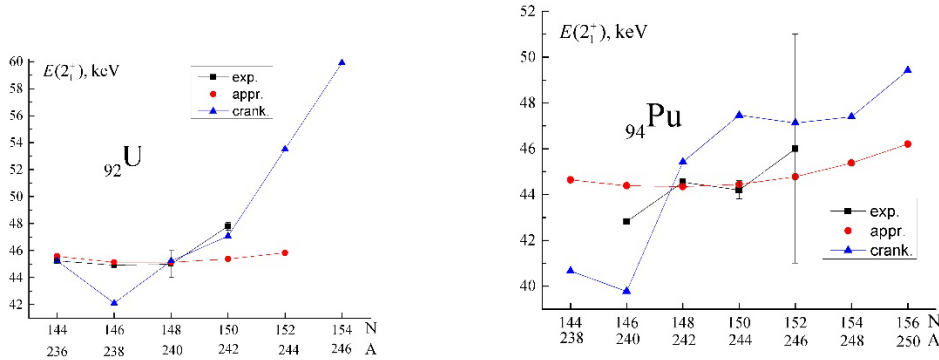
²Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

³Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

*e-mail: efimov98@mail.ru

Understanding shell-gap evolution in neutron-rich nuclei is crucial for exploring the still-unknown r-process pathway and the formation of the heaviest elements. Nuclei around the deformed $N = 152$ gap in the actinium to fermium region ($Z = 89-100$) offer key insights into shell evolution and the predicted island of stability for superheavy nuclei. In this work, theoretical calculations are compared with the limited available experimental data and extended toward the unknown region to guide future experiments aimed at synthesizing these nuclei. Standard fusion methods, which have been successful in producing nuclei in this region, have reached their experimental limits, and multinucleon transfer (MNT) reactions are considered a promising alternative [1]. However, the simultaneous production of many isotopes makes their separation and identification challenging, highlighting the importance of reliable prior predictions of nuclear properties.

A pronounced shell gap is observed in neutron-rich actinide nuclei and is particularly strong in ^{246}Pu ($N = 152$), as reported in Ref. [2]. With increasing proton number, especially in Cm, Cf, and Fm isotopes, the gap shifts toward higher neutron numbers ($N \geq 154$), while in uranium isotopes it appears already at $N \geq 150$ and, according to our calculations, becomes even more pronounced at $N = 152$. The calculations were performed within the self-consistent nuclear mean-field framework using the Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) method and the cranking model with the UDF1m energy density functional (see Refs. [3]). In addition to the experimental energies and the results of calculations using the CHFB+LN method, the figures also show energies obtained from approximations based on deformation energies [4]. These energies were derived using the Gogny forces. Recent estimates indicate that the Gogny interaction does not reproduce the shell gap in the region around $N = 152$. However, outside this region, the approximation based on the analysis of the energies of actinides and superheavy nuclei is successful. This is clearly demonstrated in the figures for U and Pu isotopes, where the energies are given in keV.



References

1. S. Heinz, H. M. Devaraja, Eur. Phys. J. A **58**, 114 (2022).
2. D. Ackermann 2025. URL: <https://arxiv:2501.04053v7> [nucl-ex] 17 Nov2025.
3. J. Dobaczewski, P. Baczyk, P. Becker, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **48**, 102001 (2021).
4. A. D. Efimov, I. N. Izosimov, Mosc. Univ. Phys. Bull. **78**, 121 (2023).

О природе низколежащих состояний ядра ${}^7\text{Li}$

М. А. Жусупов^{1,2}, К. А. Жаксыбекова², А. С. Копенбаева^{2,3}, Р. С. Кабатаева^{3*}

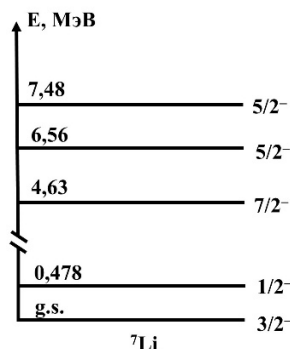
¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

*e-mail: raushan.kabatayeva@gmail.com

Рассмотрим спектр низколежащих уровней ядра ${}^7\text{Li}$. Экспериментальные значения уровней взяты из работы [1].



Экспериментальные спектры уровней ядра ${}^7\text{Li}$

ВФ основного состояния $3/2^-$ содержит 5 компонент [1] (табл. 7):

$$\Psi_{\text{осн.}} = 0,986 [43] {}^{22}\text{P} - 0,020 [421] {}^{22}\text{P} - 0,132 [421] {}^{24}\text{P} - 0,062 [421] {}^{22}\text{D} - 0,065 [421] {}^{24}\text{D}. \quad (1)$$

Как видно из формулы (1), явно просматриваются 2 кластерных канала [43] и [421], что на языке потенциальной кластерной модели соответствуют $\{\alpha t\}$ - и $\{\alpha dn\}$ -каналам. Причем $\{\alpha t\}$ -канал является абсолютно доминирующим для основного состояния и содержит 97% полной волновой функции. Но для уровня $5/2^-$ при 7,48 МэВ эти соотношения меняются на противоположные, то есть абсолютно доминирующим является $\{\alpha dn\}$ -канал с волновой функцией $\Psi(5/2^-) = 0,981 [421] {}^{24}\text{P}$, а $\{\alpha t\}$ -канал является примесью. А для уровня $5/2^-$ при 6,56 МэВ доминирующим является $\{\alpha t\}$ -канал с волновой функцией $\Psi(5/2^-) = 0,985 [43] {}^{22}\text{F}$, а $\{\alpha dn\}$ -канал будет примесью. Таким образом для основного состояния ядер всегда имеется абсолютно доминирующий канал, в данном случае [43], поэтому для расчета характеристик основного состояния нет необходимости учитывать связь каналов. В возбужденных же состояниях картина может быть другой, как описано выше.

Список источников

1. А. Н. Бояркина, Структура ядер 1p-оболочки. М. : Изд-во МГУ, 1973. 63 с.

О связи каналов в потенциальных кластерных моделях

М. А. Жусупов¹, С. К. Сахиев¹, Р. С. Кабатаева^{2*}

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

*e-mail: raushan.kabatayeva@gmail.com

В многочастичной модели оболочек различные кластерные каналы описываются симметричными схемами Юнга. В основном состоянии ядра кластеры обладают максимальной пространственной симметрией: [4] – для α -кластера, [3] – для тритонов, [2] – для дейтронов. Тогда, зная схемы Юнга для волновой функции, можно найти и кластерную структуру ядра, и связь кластерных каналов в ядре. Запишем ВФ основного состояния ядра ${}^9\text{Be}$ [1] (табл. 24) в многочастичной модели оболочек:

$$\begin{aligned}\Psi_{\text{осн.}} = & 0,899 [441] {}^{22}\text{P} - 0,387 [441] {}^{22}\text{D} + 0,023 [432] {}^{22}\text{P} + 0,121 [432] {}^{24}\text{P} + \\ & + 0,111 [432] {}^{22}\text{D} + 0,054 [432] {}^{24}\text{D} + 0,049 [432] {}^{24}\text{F} - 0,089 [4311] {}^{24}\text{S} + \\ & + 0,006 [4311] {}^{22}\text{D} + 0,046 [4311] {}^{24}\text{D} + 0,012 [4221] {}^{22}\text{P} + \\ & + 0,013 [4221] {}^{24}\text{P} + 0,018 [4221] {}^{26}\text{P}.\end{aligned}\quad (1)$$

Как видно из формулы (1), ВФ содержит 13 компонент и 4 кластерных канала. Первые 2 компоненты имеют симметрию [441], то есть относятся к $\{\alpha\alpha n\}$ -каналу. Общий вес его равен 0,96 – это сумма квадратов коэффициентов при соответствующих компонентах. Далее следуют 5 компонент, относящихся к каналу $\{\alpha t d\}$ с общим весом 0,03. То есть 96 % в волновой функции приходится на $\{\alpha\alpha n\}$ -канал и 3% на канал $\{\alpha t d\}$. Два последних канала $\{\alpha t p n\}$ и $\{\alpha d d n\}$ вместе дают вклад в 1%. Таким образом, абсолютно доминирующим является $\{\alpha\alpha n\}$ -канал и вес его в 32 раза больше, чем вес $\{\alpha t d\}$ -канала. В наблюдаемое сечение вклад каналов пропорционален величине 32^4 , то есть различие в 10^6 раз. Поэтому связь каналов совершенно не важна, а необходимо знать доминирующий канал, которым можно и ограничиться при построении ВФ для дальнейшего использования в расчетах соответствующих характеристик. В работе [2] в качестве доминирующего канала неправильно выбран примесный канал $\{\alpha t d\}$ для ядра ${}^9\text{Be}$ в основном состоянии. И, к тому же, использовалась однокомпонентная волновая функция, то есть чистая LS-связь, что также не является верным.

Список источников

1. А. Н. Бояркина, Структура ядер 1p-оболочки. М. : Изд-во МГУ, 1973. 63 с.
2. Н. А. Буркова, С. Б. Дубовиченко, Известия ВУЗов. Физика. **51**(1), 85 (2008).

Моделирование кросс-толка нейтронов в плотноупакованных сцинтилляционных сборках для экспериментов по множественности мгновенных нейтронов деления

О. В. Сидорова^{1, 2*}, Ш. С. Зейналов¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*e-mail: sidorova@jinr.ru

В экспериментах по измерению множественности мгновенных нейтронов деления используется плотная упаковка детекторов для повышения геометрической эффективности. В таких системах возникает кросс-толк нейтронов – регистрация одного нейтрона в нескольких детекторах вследствие последовательного упругого рассеяния на протонах. В отличие от гамма-кросс-толка, нейтронный кросс-толк не может быть подавлен методами n/γ -разделения и представляет собой принципиально неустранимый фон, искажающий измеряемые распределения множественности. Ранее авторами были выполнены расчеты вероятностей нейтронного кросс-толка различной кратности для аналогичной геометрии [1].

В настоящей работе представлены новые результаты Монте-Карло моделирования нейтронного кросс-толка для 32-детекторной сферической сборки на основе жидких сцинтилляторов [2]. Модель включает упругое пр-рассеяние с изотропным угловым распределением в системе центра масс. Получены корреляционные карты энерговыделений в целевом и кросс-толковом детекторах, построенные по той же методике, что и для гамма-квантов, с использованием энергетической калибровки [3]. Проведено сравнение структуры гамма- и нейтронного кросс-толка при одинаковой геометрии. Обсуждается энергетическая структура нейтронного кросс-толка, ее отличие от гамма-случая, а также влияние порогов дискриминации на наблюдаемую вероятность кросс-толка. Приводятся количественные оценки потерь кросс-толка и полезных событий при различных уровнях дискриминации.

Список источников

1. O. V. Sidorova, Sh. S. Zeynalov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **88**, 1262 (2024).
2. Eljen Technology, EJ-301, EJ-309 Data Sheet. URL: <https://eljentechnology.com/products/liquid-scintillators/ej-301-ej-309>.
3. Sh. S. Zeynalov, O. V. Sidorova, D. B. Berikov [et al.], Eurasian J. Phys. Funct. Mater., in press.

Диагностика пучков заряженных частиц и определение коэффициентов вторичной электронной эмиссии материалов

Е. О. Землин^{1*}, В. И. Жеребчевский¹, Н. А. Мальцев¹, М. Ф. Кудояров², В. В. Петров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

*e-mail: zemlin.egor2011@yandex.ru

Проектирование и создание современных ускорительных комплексов требует внедрения широкого спектра инженерных и технологических решений, связанных с диагностикой пучков заряженных частиц. Одной из ключевых задач экспериментов с использованием ускорительной техники является точное определение параметров пучка, включая его пространственное распределение, эмиттанс и другие характеристики. В работе представлена разработанная в СПбГУ многосенсорная система мониторинга пучков заряженных частиц и тяжелых ионов [1]. Система предназначена для визуализации профилей пучков протонов, дейтронов, альфа-частиц и тяжелых ионов в широком диапазоне энергий. Принцип действия системы основан на эффекте вторичной электронной эмиссии. Конструкция системы включает сканирующую сетку сенсоров, размещённую внутри ионопровода ускорителя. При взаимодействии частиц пучка с поверхностью сенсоров происходит выбивание вторичных электронов, вследствие чего каждый сенсор становится источником тока. Существенной особенностью системы является возможность применения сенсоров, изготовленных из различных материалов и сплавов. Это позволяет исследовать процессы вторичной электронной эмиссии материалов при их облучении как лёгкими заряженными частицами, так и тяжёлыми ионами в широком энергетическом диапазоне.

В работе приведены результаты экспериментов, выполненных на Уникальной научной установке (УНУ) "Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе циклотрон типа У-120" с использованием пучков протонов с энергией 3 МэВ и ионов $^{40}\text{Ar}^{+8}$ с энергией 53 МэВ. В ходе экспериментов были визуализированы профили пучков, а также исследованы характеристики сигналов, формируемых сенсорами системы при взаимодействии с частицами пучка. Обработка экспериментальных данных позволила определить коэффициенты вторичной электронной эмиссии вольфрама — материала сенсоров. Полученные результаты стали основой для проверки теоретических моделей процессов вторичной электронной эмиссии при взаимодействии вещества с заряженными частицами и тяжёлыми ионами низких и средних энергий.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Список источников

1. В. И. Жеребчевский, Е. О. Землин, Н. А. Мальцев, Многосенсорная система мониторинга пучков заряженных частиц и тяжелых ионов. Патент РФ №2830097, кл. G01T 1/34 (2024.08).

Изучение формата ENDF-6 для извлечения ядерных данных по реакциям с нейтронами

А. П. Зуев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: alexanderzyev1@gmail.com

Оцененные данные по характеристикам ядерных реакций широко используются при моделировании различных ядерно-физических установок. Наиболее известные библиотеки (ENDF, JEFF, JENDF, CENDL и другие) содержат данные в ASCII-файлах в формате ENDF [1,2]. Работа с ними осложнена из-за устаревшего формата записи данных, трудного для проверки человеком и требующего разработки специализированных процедур парсинга для их корректного считывания. В настоящее время существуют Python-библиотеки для считывания этих файлов: `endf-python`, `endf`, `endf-parserpy`, `PyNe`. Для C++ есть библиотеки `ENDFtk` и `DeCE`, увы, не очень хорошо документированные. Следует отметить, что все перечисленные решения требуют от пользователя уверенного знания формата ENDF.

Однако, возможен и другой подход: создать библиотеку, в которой объектам будут соответствовать физические сущности: «ядро», «ядерное состояние», «гамма-переход», реализованный в библиотеке `TalysLib` [<https://github.com/terawatt93/talyslib>]. Эта библиотека используется в проекте TANGRA для работы с ядерными данными и программой `Talys` [3], и интеграция в нее возможности работы с оцененными данными представляется важной задачей. В докладе будет представлен краткий обзор существующих решений для работы с ENDF, рассказано об основных возможностях `TalysLib` и написании модификации нее для работы с файлами в формате ENDF-6.

Список источников

1. A. Trkov, M. Herman, D. ENDF-6 Formats Manual. Brookhaven National Laboratory, 2018.
2. M. Herman ENDF/B-VIII.0 Library. National Nuclear Data Center, (2018).
3. A. Koning, D. Rochman. Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System, 2012.
4. R. Brun, F. Rademakers ROOT – An object oriented data analysis framework.

Исследование реакции $n + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p$ при энергии нейтронов 20 МэВ

А. А. Каспаров*, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, В. В. Мицук, И. А. Мазур

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: kasparov200191@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментального исследования реакции nd -развала при энергии нейтронов 20 МэВ. В кинематически полном эксперименте с регистрацией всех трех вторичных частиц, проведенном на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН, были определены низкоэнергетические характеристики np -взаимодействия. Энергия первичного нейтрона и протона от развала np -системы восстанавливалась по известным углам вылета и энергиям двух нейтронов и факту регистрации развального протона в активной дейтерированной мишени. Энергия виртуального ${}^1S_0$ np -состояния $E_{np} = 62 \pm 4$ кэВ и соответствующее значение длины рассеяния $a_{np} = -24.6 \pm 0.8$ Фм получены из сравнения экспериментальной зависимости выхода реакции nd -развала от относительной энергии np -пары с результатами моделирования.

Анализ полученных значений длин np -рассеяния в совокупности с данными других экспериментов [1-8] подтверждает гипотезу о влиянии $3N$ -сил на величины извлекаемых характеристик np -взаимодействия в реакциях с малонуклонными системами [9] и дает новую асимптотическую длину np -рассеяния $a_{np} = -23.8 \pm 0.3$ Фм.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

Список источников

1. A. Niiler [et al.], Phys. Rev. **182**, 1083 (1969).
2. H. Bruckmann [et al.], Nucl. Phys. A **157**, 209 (1970).
3. Z. Ying-Ji [et al.], Phys. Rev. C **47**, 468 (1993).
4. D. E. Gonzalez Trotter [et al.], Phys. Rev. Lett. **83**, 3788 (1999).
5. V. Huhn [et al.], Phys. Rev. C **63**, 014003 (2000).
6. J. Deng [et al.], Phys. Rev. C **66**, 047001 (2002).
7. A. A. Kasparov [et al.], Phys. Atom. Nucl. **86**, 44 (2023).
8. A. A. Kasparov [et al.], Phys. Atom. Nucl. **88**, 374 (2025).
9. A. A. Kasparov [et al.], «NUCLEUS-2025», Book of Abstracts. **121** (2025).

Моделирование подпорогового рождения антипротонов и кумулятивных процессов в столкновениях тяжелых ионов

В. Н. Коваленко, Е. В. Андронов*, М. А. Жаров

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: e.v.andronov@spbu.ru

Образование адронов в ядерных столкновениях при энергиях ниже кинематического порога взаимодействия свободных нуклонов служит чувствительным инструментом для исследования многонуклонных корреляций и коллективной динамики в плотной ядерной материи [1], [2]. В докладе рассматривается механизм, основанный на учёте кратковременных многонуклонных флуктуаций плотности в ядре (флуктонов) [3]. Взаимодействие налетающей частицы с таким коррелированным кластером увеличивает эффективную инвариантную массу мишенной системы, открывая кинематические каналы, запрещённые в стандартном приближении. Данный подход обеспечивает единое описание как подпорогового рождения, так и кумулятивных эффектов ($x > 1$) [4], [5].

Представлена схема внедрения динамики флуктонов в Монте-Карло генераторы событий [6, 7]. Описывается алгоритм генерации N-нуклонных конфигураций в начальном состоянии ядра, калибровка модели по имеющимся данным по кумулятивному рождению пи-мезонов и подпороговых антипротонов, а также стратегия валидации на основе имеющихся экспериментальных данных [8, 9]. Приводятся предварительные оценки выхода антипротонов в условиях эксперимента MPD на коллайдере NICA [10, 11].

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 153212394

Список источников

1. O. Hen [et al.], Rev. Mod. Phys. **89**, 045002 (2017).
2. W. Cassing, E. Bratkovskaya, Phys. Rep. **308**, 65 (1999).
3. V.V. Burov [et al.], Phys. Rep. **125**, 67 (1985).
4. A. M. Baldin [et al.], Sov. J. Nucl. Phys. **18**, 41 (1974).
5. A. M. Baldin, Nucl. Phys. A **387**, 3c (1982).
6. M. Bleicher [et al.], J. Phys. G **25**, 1859 (1999).
7. J. Weil [et al.], Phys. Rev. C **94**, 054905 (2016).
8. A. A. Baldin [et al.], Nucl. Phys. A **519**, 407 (1990).
9. A. Schriiter, Z. Phys. A **350**, 101 (1994).
10. V. Abgaryan [et al.], Eur. Phys. J. A **58**, 140 (2022).
11. R. Abdulin [et al.], Rev.Mex.Fis. **71**, 041201 (2025).

Рождение странных частиц в pp- и AA-столкновениях в расширенной модели мультипомеронного обмена

В. Н. Коваленко*, А. М. Пучков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.kovalenko@spbu.ru

Работа посвящена развитию расширенной модели мультипомеронного обмена (ММПО) [1–5] для описания процессов рождения странности в адронных и ядерных столкновениях в широком диапазоне энергий. В модель интегрирован модифицированный подход для учета механизмов околопорогового рождения странных частиц [6], что критически важно в области промежуточных энергий. Проведена верификация развиваемой модели на экспериментальных данных по pp- и AA-столкновениям в диапазоне энергий SPS и RHIC. В рамках модифицированного подхода выполнен детальный расчет выходов и энергетических спектров странных частиц в условиях планируемых экспериментов на коллайдере NICA [7], [8].

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 153212394

Список источников

1. V. Kovalenko, G. Feofilov, A. Puchkov, F. Valiev, Universe. **8**, 246 (2022).
2. V. Vechernin, E. Andronov, V. Kovalenko, A. Puchkov, Universe **10**, 56 (2024).
3. N. Armesto, D. A. Derkach, G. A. Feofilov, Phys. Atom. Nucl. **71**, 2087 (2008).
4. E. O. Bodnya, V. N. Kovalenko, A. M. Puchkov, G. A. Feofilov, AIP Conf. Proc. **1606**, 273 (2015).
5. V. N. Kovalenko, A. M. Puchkov, G. A. Feofilov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **80**, 8 (2016).
6. A. Galoyan, A. Ribon, V. Uzhinsky, Nucl. Theor. **37**, 1 (2018); arXiv:1810.09973 [hep-ph].
7. V. Abgaryan [et al.], (MPD Collaboration), Eur. Phys. J. A **58**, 140 (2022).
8. R. Abdulin [et al.], (MPD Collaboration), MPD physics performance studies in Bi+Bi collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV, Rev. Mex. Fis. **71**, 041201 (2025).

Исследование сцинтилляционных детекторов, применяемых в диагностических системах время-пролётной позитронно-эмиссионной томографии

Д. А. Комарова, В. И. Жеребчевский*, Е. О. Землин, Н. А. Мальцев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: v.zherebchevsky@spbu.ru

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является одним из наиболее информативных методов медицинской диагностики, позволяющим регистрировать распределение радиофармпрепаратов (в итоге получаем радионуклидное изображение органов и тканей) в организме пациента на клеточном уровне. Точность реконструкции изображения определяется пространственным и временным разрешением детекторной системы. Технология времени пролёта (Time-of-Flight, TOF) позволяет локализовать акт аннигиляции вдоль линии отклика, что существенно улучшает отношение сигнал/шум реконструируемых изображений [1], [2].

Эффективность TOF-ПЭТ определяется характеристиками сцинтилляционных детекторов. Используемые в современных ПЭТ сцинтилляционные сенсоры: BGO, LYSO, имеют различные характеристики. BGO обладает высокой эффективностью регистрации, но низким и длительным временем высвечивания. LYSO характеризуется высоким световыходом и малым временем высвечивания, что делает его предпочтительным материалом для использования в методах TOF-ПЭТ [3]. В качестве фотодетектора используется кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiPM), обладающий высокими временными характеристиками, однако на его коэффициент усиления оказывает влияние изменение температуры.

В работе проведено экспериментальное сравнение детекторных сборок BGO+SiPM и LYSO+SiPM, а также пластического сцинтиллятора+SiPM. Исследованы спектрометрические характеристики, температурная стабильность и временное разрешение с использованием 32-канальной ASIC Petiroc2A. Установлено, что временное разрешение для LYSO+SiPM составило в среднем 282 пс, что в 2 раза лучше, чем для BGO+SiPM. Полученные результаты показывают, что кристалл LYSO является перспективным материалом для создания детекторных модулей TOF-ПЭТ.

Список источников

1. M. Conti, Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. **38**(6), 1147 (2011).
2. G. Terragni, V. Nadig, E. Tribbia [et al.], Phys. Med. Biol. **70**(2), 025015 (2025).
3. C. L. Melcher, J. Nucl. Med. **41**(6), 1051 (2000).

Безнейтринный двойной электронный захват, стимулируемый рентгеновскими лучами

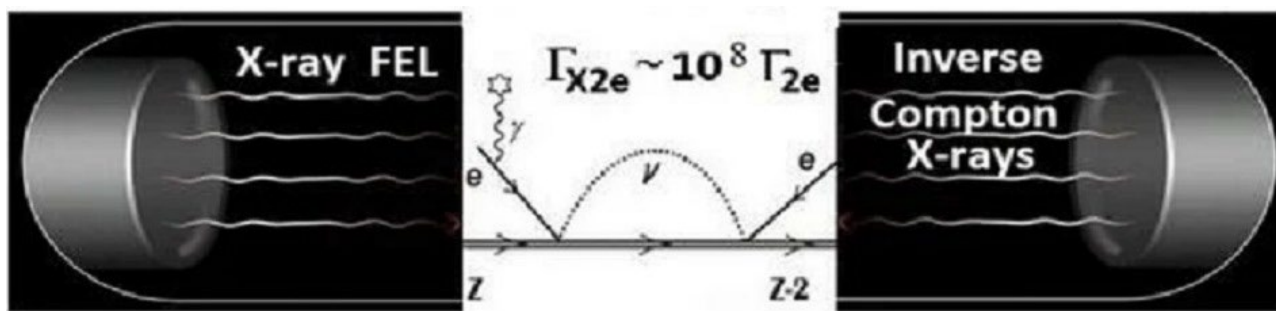
В. Н. Кондратьев^{1*}, Ф. Ф. Карпешин²

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
имени Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: vkondrat@jinr.ru

Рассмотрена возможность воздействия электромагнитного излучения на ядерные процессы на примере безнейтринного двухэлектронного захвата – $0\nu 2e$ с. Для случаев рентгеновских лазеров на свободных электронах – XFEL и/или обратных комптоновских рентгеновских источников показано, см. [1] и рисунок, что такой распад может быть значительно усилен за счет настройки системы на резонансные условия посредством поглощения и/или испускания фотона с энергией Δ дефекта резонанса распада. В этом случае скорость распада Γ_{2e} нуклида Z за $0\nu 2e$ с линейно возрастает с увеличением напряженности поля – S/S_z – до мощности потока рентгеновского излучения $S_m \sim Z^6$, а $S_z \sim Z^6 (\Gamma/\Delta)^2$ с увеличением ширины распада Γ дочернего атома. Для случая захвата $^{78}\text{Kr} \rightarrow ^{78}\text{Se} - 0\nu 2e c L_1 L_1$ мы находим $S_z \sim 10^8$ Вт/см² и $S_m \sim 10^{18}$ Вт/см², что указывает на возможность увеличения скорости распада на восемь порядков или даже больше.



Схематическое изображение безнейтринного двухэлектронного захвата
под воздействием потока рентгеновского излучения

Список источников

1. V. N. Kondratyev, F. F. Karpeshin, Atoms. **12**(5), 27 (2024).

Особенности ядерных реакций с получением ^{99m}Tc на пучках протонов с энергиями до 100 МэВ

А. М. Кострыгина¹, В. И. Жеребчевский^{1*}, И. Е. Алексеев², Д. А. Амеркамов³, Е. М. Иванов³,
Н. А. Мальцев¹, В. В. Петров¹, Е. О. Землин¹, Н. А. Прокофьев¹, С. Ю. Торилов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²АО «Радиевый институт имени В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Москва, Россия

*e-mail: v.zherebchevsky@spbu.ru

В современных методах ядерной медицины важной проблемой является ранняя диагностика и выявление злокачественных новообразований. Для получения информации о функциональных, анатомических и метаболических процессах в опухолях или метастатических узлах можно эффективно использовать различные радиофармацевтические препараты. Диагностическая информация, предоставляемая радиофармацевтическими препаратами (радионуклидная визуализация), должна отражать все физиологические и патологические состояния в организме человека. Другой важнейшей задачей в методах ядерной медицины является адресная доставка соответствующих радиофармацевтических препаратов к раковым клеткам. Объединение методов радионуклидной визуализации с методами радионуклидной терапии (тераностика) даёт отличный результат в лечении и диагностике рака с минимальными побочными эффектами. Поэтому необходимо исследовать ядерные реакции, идущие под действием протонов (с испарением одного или нескольких нуклонов на заключительных стадиях), с образованием в конечных каналах медицинских радионуклидов, которые используются для эффективной ранней диагностики и лечения различных онкологических заболеваний [1]. К таким радионуклидам относится ^{99m}Tc , широко применяемый в диагностике с использованием однофотонной эмиссионной томографии, а также другие радиоактивные изотопы Tc, испускающие бета-электроны или оже-электроны для таргетной терапии онкологических опухолевых образований.

В работе представлены экспериментальные результаты ядерных реакций с получением ^{99m}Tc на пучках протонов с энергиями в диапазоне от 20 МэВ и до 100 МэВ. Обсуждается получение изотопов технеция на малогабаритных циклотронах и циклотронах средних энергий.

Список источников

1. V. I. Zherebchevsky [et al.], Bull. Rus. Acad. Sci.: Physics. **87**(8), 1207 (2023).

Стенд для проведения нейтронной активации

В. Г. Зиновьев¹, Лю Дэжуй^{1,2}, Д. А. Румянцева¹, И. А. Митропольский¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: st066019@student.spbu.ru

В программе фундаментальных и прикладных исследований на реакторе ПИК предполагаются спектроскопические исследования реакций с нейтронами: спектроскопия нечетно-нечетных ядер, изучение изомерных состояний, нейтронно-активационный анализ. Для методической подготовки этих исследований в ПИЯФ был создан стенд нейтронной активации на основе Pu-Be источника нейтронов.

Источник нейтронов ИБН-8-5 с активностью $2.4 \cdot 10^{11}$ Бк на момент изготовления обеспечивал нейтронный поток $0.95 \cdot 10^7$ с⁻¹. Период полураспада ²³⁸Pu составляет 87.7 лет, но срок службы источника из-за коррозионной стойкости ограничен 10 годами. Спектр нейтронов от источника простирается до энергии 10 МэВ со средней энергией около 4.5 МэВ. Стенд позволяет использовать водяной замедлитель и фильтры для работы с нейтронами выделенной энергии. Результаты моделирования нейтронного и гамма-спектра от источника [1] использовались для расчета защиты установки и спектрометрического тракта. Последний состоит из коаксиального детектора на основе HPGe, предусилителя и анализатора. Полученные спектры обрабатывались с помощью программного обеспечения Genie-2000.

На стенде проведены первые опыты по активации Вг и Ау. Получены энергетические и временные спектры распада продуктов нейтронного захвата. Определены периоды полураспада: по линии 776.5 кэВ в ⁸²Вг получено $T_{1/2}=1.4(1)$ сут., при табличном значении 1.47 сут. В ¹⁹⁸Ау линия 411.8 кэВ дала $T_{1/2}=2.6(1)$ сут., табличное значение 2.69 сут. Эти результаты использовались для определения спектральной эффективности детектора и потока тепловых $1.1(4) \cdot 10^3$ н·см⁻²·с⁻¹ и эпитепловых $56(9)$ н·см⁻²·с⁻¹ нейтронов на образце.

Эти результаты позволяют надеяться на успешное проведение методических исследований в области нейтронно-активационного анализа.

Список источников

1. К. В. Ершов. Расчет нейтронных и гамма-спектров плутоний-бериллиевого источника в программном пакете PhiTs. Препринт ПИЯФ – 3032, Гатчина, 2018. 10 с.

Determination of the distribution coefficients of elements in the diacetyl/hydrochloric acid system for nuclear medicine applications

G. Y. Magomedov^{1,2*}, N. A. Mirzayev^{2,3}, A. E. Baimukhanova^{3,4}, E. P. Magomedbekov¹, D. V. Filosofov²

¹Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Institute of Physics Ministry of Science and Education of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

⁴Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: magomedov@jinr.ru

The development of selective radiochemical separation systems is an important prerequisite for the production, purification, and quality control of radionuclides used in nuclear medicine [1]. Distribution coefficients (K_d) provide quantitative information on the affinity of elements toward a selected sorption material and therefore represent a key parameter for evaluating separation selectivity, optimizing elution conditions, and predicting impurity behavior in radiochemical processes [2]. In this work, the distribution coefficients of selected elements were determined in the diacetyl/hydrochloric acid system using two sorption materials with different functional properties: the strong-acid cation-exchange resin DOWEX 50WX8 and the chelating resin Chelex 100.

Static batch experiments were carried out in hydrochloric acid media of two concentrations, 0.1 and 0.3 M HCl, with different diacetyl contents: 0, 20, 90, and 95%. These experimental points were selected to evaluate the influence of both acid concentration and organic solvent fraction on the retention of elements. Resin samples were contacted with solutions containing known concentrations of the studied elements until equilibrium was reached. After equilibration, the liquid phase was separated, and elemental concentrations were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS. The obtained equilibrium concentrations were used to calculate K_d values and to compare the sorption behavior of elements on DOWEX 50WX8 and Chelex 100 under identical chemical conditions.

Diacetyl was selected as the organic component because it can modify the solvent environment and act as a neutral solvating medium. This property may influence metal ion speciation, solvation, and interaction with functional groups of ion-exchange or chelating resins [3]. In addition, the high volatility of diacetyl is an important practical advantage for radiochemical applications. After elution, diacetyl can be readily removed by evaporation, allowing the eluate to be concentrated and transferred into a small-volume aqueous medium without introducing persistent organic residues [4]. This feature is particularly relevant for radionuclide purification procedures, where the final solution should be compatible with subsequent radiolabelling, formulation, or analytical control.

The comparison of DOWEX 50WX8 and Chelex 100 provides insight into different retention mechanisms, including cation-exchange and chelation-based interactions. The obtained K_d values reveal changes in element retention depending on hydrochloric acid concentration, diacetyl content, and resin functionality. Particular attention was given to elements relevant to radionuclide production, target material processing, and impurity control in nuclear medicine applications.

The results provide a quantitative basis for selecting promising separation conditions in diacetyl/hydrochloric acid media and may contribute to the development of efficient purification schemes for medically relevant radionuclides.

Список источников

1. International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna (2010).
2. N. A. Mirzaev [et al.], Russ. J. Phys. Chem. A **94**, 1190 (2020).
3. F. W. E. Strelow [et al.], Anal. Chem. **54**(3), 457 (1982).
4. E. M. F. Lima [et al.], Molecules. **31**(4), 663 (2026).

Экспериментальная установка для определения спектра энергии возбуждения ядра ^{10}Be в реакции $n + ^9\text{Be}$

М. В. Мордовской¹, А. А. Каспаров¹, А. А. Афонин¹, А. И. Драчев¹, В. В. Мицук^{1*},
В. М. Лебедев², В. Н. Пономарев¹, А. Н. Сахаров¹

¹Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: vyacheslav.mitsuk@phystech.edu

На нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН планируется проведение эксперимента по исследованию реакции взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами ^9Be . Цель эксперимента состоит в определении спектра энергии возбуждения ядра ^{10}Be для поиска квазимолекулярных структур $^4\text{He} + ^6\text{He}$ в ядре ^{10}Be .

Проведена модернизация установки для исследования свойств высоко возбужденных состояний легких ядер [1] и создана экспериментальная установка для определения спектра энергии возбуждения ядра ^{10}Be в реакции $n + ^9\text{Be}$. Установка тестировалась в коротком пучковом сеансе канала РАДЭКС ИЯИ РАН. Напыленная мишень ^9Be , полученная методом термического испарения из жидкой фазы, облучалась нейтронами широкого спектра до 247 МэВ. Несколько телескопов кремниевых полупроводниковых детекторов регистрировали в совпадении заряженные вторичные частицы по разные стороны от оси пучка. В работе представлены результаты создания установки и первые результаты по определению спектра энергии возбуждения $E_x(^{10}\text{Be})$.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

Список источников

1. M. V. Mordovskoy [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **88**, S135 (2024).

Измерение профиля пучка нейтронного поля центрального нейтронного канала на экспериментальных площадках установки РАДЭКС ИЯИ РАН

М. В. Мордовской*, А. А. Каспаров, А. Н. Сахаров

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: mvmordovsk@mail.ru

На нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН проводятся работы по исследованию нуклон-нуклонного взаимодействия и кластерной структуры легких ядер. Различные варианты экспериментальных установок [1], [2] для таких исследований представляют собой многоплечевые спектрометры, с основными компонентами в виде кремниевых полупроводниковых детекторов для регистрации заряженных частиц, а также сцинтилляционных детекторов для регистрации нейтронов.

Возможные позиции для размещения экспериментальной установки представлены двумя площадками на центральном канале на расстоянии 12 и 20 м от нейтрон-образующей W мишени. Уже проведенные эксперименты по исследованию свойств высоко возбужденных состояний ядер ${}^6\text{Li}$ [3] и ${}^6\text{He}$ [4] на этой установке показали, что ППД детекторы, находясь даже в некоторых, считаемых ранее достаточно защищенных зонах, подвержены существенно более сильной деградации от нейтронного облучения, чем расчетная. До настоящего времени распределение нейтронного потока на этом канале только оценивалось, а измерений не проводилось. В связи с этим были проведены измерения геометрического распределения потоков нейтронов центрального канала РАДЭКС ИЯИ РАН одновременно на двух указанных ранее площадках. При измерениях использовались сцинтилляционные детекторы типа NE213 и аппаратура, позволяющая проводить n - γ разделение.

Полученные данные должны позволить правильно рассчитывать геометрию эксперимента, мест установки детекторов установки и их защиты.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

Список источников

1. A. A. Kasparov [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **86**, 889 (2022).
2. M. V. Mordovskoy [et al.], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **88**, S135 (2024).
3. М. В. Мордовской [и др.], ЯФ. **88**, 116 (2025).
4. M. V. Mordovskoy [et al.], Phys. Atom. Nucl. **90**, 821 (2026).

Поиск бустерной темной материи, ускоренной электронами космических лучей

А. В. Дербин, И. С. Драчев, Д. В. Иванов, В. Н. Муратова*, М. А. Панкратов,
Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

*e-mail: muratova_vn@pnpi.nrcki.ru

Эксперименты по поиску частиц темной материи (ТМ), такие как XENON, LZ, PandaX, DarkSide и другие [1] основаны на упругом рассеянии нерелятивистских частиц (χ) на ядре посредством спин-независимых и спин-зависимых (χ -N)-взаимодействий. Прямые эксперименты теряют чувствительность при массах темной материи ниже ГэВ, поскольку легкие частицы темной материи не могут передать ядрам энергии выше порога регистрации детектора. Процесс упругого (χ -e)-рассеяния ТМ на электронах позволяет, частично, продвинуться в область более легких частиц. Несколько экспериментов были посвящены поиску (χ -e)-рассеяния с использованием детекторов на жидких благородных газах XENON, DarkSide, PandaX и твердотельных детекторов SuperCDMS, EDELWEISS, DAMIC, CDEX и SENSEI [1].

Бустерная (ускоренная) темная материя (БТМ) – термин, появившийся в последнее десятилетие, - возникает из обычной холодной ТМ при ее взаимодействии с частицами Стандартной Модели или ряда других процессов, таких как аннигиляция и распады более тяжелых частиц ТМ. Релятивистские частицы БТМ могут появляться в результате ускорения ТМ космическими лучами, диффузным нейтринным фоном, излучением сверхновых, джетами блазаров и Солнцем. В отличие от холодной ТМ, частицы БТМ могут оставлять сигнал с энергией порядка МэВ в существующих нейтринных детекторах или детекторах ТМ, при взаимодействии с электронами или ядрами.

Детектор солнечных нейтрино Borexino имеет очевидное преимущество перед другими детекторами, связанное с рекордно низким уровнем фона, при поиске сигналов БТМ, ожидаемых в низкоэнергетической области до 20 МэВ. В данной работе мы проанализировали энергетический спектр детектора Borexino, измеренный в течение 1494 суток [2], [3], с целью поиска событий от частиц БТМ, ускоренных электронами космических лучей.

Вычислен ожидаемый энергетический спектр электронов отдачи при рассеянии частиц бустерной темной материи, ускоренной электронами космических лучей. Вычисления выполнены для различных значений масс частиц БТМ в предположении, что сечение упругого (χ -e)-рассеяния не зависит от энергии. Используя данные детектора Borexino, полученные для экспозиции 1494 сут. 266 т, установлены новые верхние ограничения на сечение рассеяния частиц ТМ на электронах на уровне (10^{-34} – 10^{-33}) cm^2 .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-12-00046.

Список источников

1. S. Navas [et al.], (Particle Data Group), Phys. Rev. D **110**, 030001 (2024) and 2025 update.
2. G. Bellini [et al.], (Borexino coll.), Phys. Rev. D **82**, 033006 (2010).
3. M. Agostini [et al.], (Borexino coll.), Phys. Rev. D **101**, 062001 (2020).

Анализ повреждения коллагена в костных биоимплантатах при радиационной стерилизации

Н. А. Николаева^{1*}, В. В. Розанов^{2,3}, С. Н. Мамаева¹,
И. В. Матвейчук³, А. П. Черняев², А. О. Хуцистова²

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Якутск, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт
лекарственных и ароматических растений, Москва, Россия

*e-mail: larsoon696@mail.ru

Коллагеновая матрица является ключевым структурным компонентом костной ткани, определяющим её механическую прочность, вязкоупругие свойства и биосовместимость. При радиационной стерилизации костных имплантатов коллаген I типа подвергается дозозависимой деградации, что ограничивает применение высоких доз облучения в тканевой инженерии и реконструктивной хирургии [1–3].

В работе исследованы радиационно-индуцированные изменения коллагеновой структуры костной ткани при радиационной и комбинированной стерилизации. В качестве модельных образцов использовали компактную костную ткань крупного рогатого скота, обработанную электронным пучком в диапазоне 5–25 кГр, а также комбинированным воздействием с предварительным озонированием.

Основное внимание уделено анализу коллагенового матрикса методами инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния. FTIR- и КР-данные выявили выраженные дозозависимые изменения амидных полос I–III, отражающие нарушение вторичной структуры коллагена, ослабление межмолекулярных взаимодействий и дестабилизацию тройной спирали. При дозах 20–25 кГр наблюдалось снижение интенсивности полос амид I и фенилаланина, а также уширение фосфатных полос $\nu_1(\text{PO}_4^{3-})$, свидетельствующее о снижении кристалличности гидроксиапатита.

Микроструктурные изменения подтверждены данными сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, показавшими фрагментацию коллагеновых фибрилл и увеличение межфибриллярных расстояний. Микромеханические испытания выявили снижение микротвёрдости и ухудшение прочностных характеристик при высоких дозах облучения.

Для количественного описания радиационных эффектов предложена физико-математическая модель, связывающая поглощённую дозу с нарушением межмолекулярных взаимодействий в коллагеновой матрице. Показано, что комбинированная стерилизация позволяет снизить радиационную нагрузку до 11–12 кГр при сохранении структуры коллагена и механической стабильности костного материала.

Список источников

1. K. Sauer, I. Zizak, J. B. Forien [et al.], Nat Commun. **13**(1), 7829 (2022).
2. K. Ng, N. Allam, M. Neshatian [et al.], PLoS One. **20**(4), e0319777 (2025).
3. В. В. Розанов, И. В. Матвейчук, А. П. Черняев [и др.], Изв. РАН: Серия физическая. **84**(4), 521 (2020).

Исследование деформаций предразрывных конфигураций фрагментов при эмиссии третьей легкой частицы

Я. О. Отводенко, Д. Е. Любашевский, Л. В. Титова*, А. Д. Юдаков, А. Р. Габитов

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

e-mail: titova_lv@phys.vsu.ru

Тройное деление представляет собой редкий (вероятность 0,2–0,4% относительно бинарного) и экзотический канал распада тяжёлых ядер, при котором наряду с двумя тяжёлыми осколками испускается лёгкая заряженная частица (в ~90% случаев α -частица). Ключевой нерешённой проблемой описания этого процесса остаются деформации предразрывных конфигураций фрагментов в момент вылета третьей частицы. Определение этих деформаций важно для понимания динамики процесса деления и может служить дополнительным контрольным параметром к таким параметрам как начальная деформация делящегося ядра (до разрыва), деформация в момент эмиссии лёгкой частицы и деформация фрагментов после разрыва. Детальное знание указанных деформаций позволяет существенно повысить точность модельных расчётов.

В работе Сейфа и Хашема [1] в рамках экваториальной кинематики получены относительные выходы и вероятности преформации лёгких частиц (^4He , ^{10}Be , ^{14}C) при делении ^{252}Cf . Полная вероятность выхода третьей частицы может быть записана как сумма по всем возможным конфигурациям предфрагментов:

$$W = \sum_{i=1}^N P_i w_i / \sum_{i=1}^N w_i, \quad (1)$$

где W – выход третьей частицы, w_i – вероятность образования i -й конфигурации предфрагментов деления, P_i – вероятность выхода третьей лёгкой частицы из конкретной предразрывной конфигурации тройного деления. Полагая, что величины w_i и W известны из эксперимента [2], из (1) можно определить вероятность P_i выхода третьей частицы для каждой конфигурации. С другой стороны, вероятность P_i в квазиклассическом приближении ВКБ [3] имеет вид:

$$P_i(\beta_1, \beta_2) = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2\mu(V(\beta_1, \beta_2) - T_3)} dr \right\}, \quad (2)$$

где β_1, β_2 – параметры квадрупольной деформации предфрагментов деления, $V(\beta_1, \beta_2)$ – сумма кулоновского и ядерного потенциалов взаимодействия предфрагментов деления с учетом их деформации, r_1, r_2 – точки поворота, T_3 – кинетическая энергия третьей частицы, μ – приведенная масса продуктов тройного деления. Варьируя параметры квадрупольной деформации β_1, β_2 предфрагментов в момент разрыва, добиваются совпадения рассчитанной P_i по формуле (2) с величиной, полученной из уравнения (1), и определяют неравновесные деформации предфрагментов для каждой предразрывной конфигурации. Предлагаемый подход даёт возможность отсеять неверные траектории эволюции делящейся системы и уточнить динамические модели тройного деления.

Список источников

1. W. M. Seif, A. S. Hashem, Phys. Rev. C **104**, 014616 (2021).
2. A. V. Andreev, G. G. Adamian, N. V. Antonenko [et al.], Eur. Phys. J. A **30**, 579 (2006).
3. N. G. Kelkar, H. M. Castaneda, Phys. Rev. C **76**, 064605 (2007).

Измерения бета-спектра ^{99}Tc с помощью спектрометра на основе Si(Li)-детекторов

И. Е. Алексеев², А. В. Дербин¹, И. С. Драчнев¹, Д. В. Иванов¹, В. Н. Муратова¹,
М. А. Панкратов^{1*}, Д. А. Семенов¹, М. В. Трушин¹, Е. В. Унжаков¹

¹Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

²АО «Радиовый институт имени В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: pankratov_ma@pnpi.nrcki.ru

Прецизионно измеренные формы разрешенных и запрещенных β -спектров и их теоретическое описание востребованы в различных областях исследований: в физике нейтрино, ядерной астрофизике, теории ядра, в радионуклидной метрологии и других областях. Целью проекта являются прецизионные измерения спектра электронов, испускаемых при различных типах разрешенных и запрещенных β -переходов, с помощью разработанных и создаваемых авторами проекта дрейфовых кремниевых детекторов с толщиной чувствительной области до 10 мм и тонкими двухсторонними входными окнами. Время жизни ядер относительно безнейтринного двойного β -распада пропорционально четвертой степени эффективной аксиально-векторной константы связи слабого взаимодействия g_A^{eff} , значение которой является основным источником неопределенности при вычислениях верхнего предела на массу майорановского нейтрино. Формы электронных спектров ряда запрещенных β -переходов весьма чувствительны к величине g_A^{eff} , в частности, недавно было показано, что форма β -спектра ^{99}Tc зависит от предположений о значении g_A^{eff} [1], что делает её высокоточное измерение весьма интересным.

Целью работы является прецизионное измерение β -спектра ^{99}Tc с помощью дрейфовых кремниевых детекторов с толщиной чувствительной области до 10 мм и тонкими двухсторонними входными окнами, которые специально разработаны и изготовлены в Петербургском институте ядерной физики НИЦ КИ для этого эксперимента. Первые измерения с источником ^{99}Tc проведены на созданном β -спектрометре в схеме «мишень-детектор» с целью описания измеренного спектра используемыми функциями отклика β -спектрометра [2]. Время измерений составило 6 месяцев, за которые зарегистрировано около 7×10^9 событий. Вычислены поправки к форме β -спектра, связанные с взаимодействием электрона с ядром и атомной оболочкой и определены значения параметров функции ядерного форм-фактора, используемой для описания формы β -спектра ^{99}Tc . В настоящее время создается новый β -спектрометр, обладающий 4π -геометрией и состоящий из двух, состыкованных вплотную, Si(Li)-детекторов. Спектрометр имеет принципиально другую, близкую к гауссовой, функцию отклика для электронов [3], [4].

Список источников

1. J. Kostensalo, J. Suhonen, Phys. Rev. D **96**, 024317 (2017).
2. I. E. Alekseev [et al.], Nucl. Instrum. Methods. A **890**, 64 (2018).
3. I. E. Alekseev [et al.], Nucl. Instrum. Methods. A **1051**, 168242 (2023).
4. A. V. Derbin [et al.], Phys. Rev. D, **112**(11), 112008 (2025).

Применение на ускорительном комплексе У-70 «карандашного пучка», выводимого изогнутым кристаллом

А. Г. Васильева, А. А. Дурум, М. Ю. Костин, В. А. Маишеев, Е. В. Парменова*,
И. В. Полуэктов, С. Ф. Решетников, Д. А. Савин, Ю. Е. Сандомирский,
Ю. А. Чесноков, А. А. Янович

Институт физики высоких энергий имени А. А. Логанова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Россия
*e-mail: Ekaterina.Parmenova@ihep.ru

Идеи профессора Э. Н. Цыганова из Дубны, касающиеся использования каналирования в изогнутых кристаллах для управления пучками частиц, нашли подтверждение и дальнейшее развитие во множестве экспериментов [1], [2]. Наиболее значимое практическое применение этот метод получил на ускорительном комплексе У-70 в Институте физики высоких энергий (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ). Там изогнутые кристаллы регулярно используются для вывода и формирования пучка частиц. Ключевым преимуществом использования изогнутого кристалла для вывода пучка является возможность получения пучка с крайне малыми поперечными размерами и низкой угловой расходимостью. Это фактически означает создание так называемого «карандашного» пучка, обладающего исключительной фокусировкой. В представленном докладе рассмотрены различные способы применения такого пучка в рамках экспериментальных установок ИФВЭ, демонстрируя его ценность для научных исследований.

Список источников

1. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, V. I. Kotov. Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin, Germany: Springer. 1997. 219 p.
2. W. Scandale [et al.], J. Mod. Phys. A. **37**, 2230004 (2022).

Анализ больших массивов радиоэкологических измерений после крупных ядерных аварий: оценка эффективных периодов полувыведения и пространственных закономерностей на открытых данных

А. Н. Пекшев*, А.-Н. В. Вуколова, С. В. Семёнов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: Pekshev_AN@nrcki.ru

Представлены результаты статистического анализа больших массивов открытых радиоэкологических данных по пространственно-временной эволюции загрязнения долгоживущими радионуклидами в зонах влияния крупных ядерных аварий (Чернобыльская АЭС, АЭС «Фукусима-Дайити») [1–4], [6,] [7]. В работе использованы опубликованные результаты гамма-спектрометрических и радиохимических измерений удельной активности цезия-137 и стронция-90 в почвах, водоёмах и элементах биоты за многолетние периоды наблюдений, агрегированные в единую базу по унифицированной схеме [1–3], [6]. Для отдельных пунктов наблюдений построены временные ряды удельной активности, аппроксимированные экспоненциальными моделями с выделением эффективных периодов полувыведения, характеризующих суммарный вклад физического распада и процессов миграции в экосистемах. Выполнен сравнительный анализ полученных эффективных периодов полувыведения для различных типов ландшафтов и климатических условий, а также сопоставление характеристик поведения радионуклидов в районах Чернобыля и Фукусимы [2–4], [7]. Пространственные закономерности распределения загрязнения исследованы с использованием вариограмм и простых моделей пространственной корреляции, что позволило количественно охарактеризовать масштабы неоднородности и выявить устойчивые структуры загрязнения на разных пространственных масштабах. Для повышения прогностических возможностей рассмотрены базовые методы машинного обучения, применённые к задаче прогноза удельной активности на горизонте до нескольких десятилетий по совокупности радиационных и геоэкологических признаков; показана информативность отдельных факторов и оценено качество получаемых моделей. Полученные результаты сопоставлены с существующими модельными представлениями о долговременной динамике радиоактивного загрязнения и могут использоваться для уточнения оценок долгосрочных доз облучения критических групп населения и оптимизации программ мониторинга в поставарийных условиях [3–7].

Список источников

1. M. H. Paller, G. T. Jannik, J. Environ. Radioact. **131**, 81 (2014).
2. A. Ueda et al., Environ. Sci.: Processes Impacts. **22**, 1372 (2020).
3. T. Kinase [et al.], Sci. Rep. **10**, 21627 (2020).
4. M. Watanabe [et al.], Glob. Environ. Res. **24**(2), 85 (2020).
5. J. Vives i Batlle, H. Vandenhove, Ann. ICRP. **44**(1S), 331 (2015).
6. Г. Г. Онищенко [и др.], Радиационная гигиена. **14**(1), 6 (2021).
7. С. А. Гераськин [и др.], Радиационная биология. Радиоэкология. **61**(3), 234 (2021).

Перспективы применения сухой ионно-плазменной технологии дезактивации оборудования ЯЭУ из титановых сплавов

А. С. Петровская*, А. Б. Цыганов

ООО «ИнноПлазмаТех», Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: anita3425@yandex.ru

Одна из главных проблем эксплуатации энергетического оборудования заключается в радиационном загрязнении конструктивных элементов, что ставит задачу поиска эффективной технологии его дезактивации, как в процессе вывода из эксплуатации, так и при плановых ремонтах. Химический состав радиоактивных загрязнений и величина активности зависят от типа реакторной установки, времени и режимов ее эксплуатации. Например, при эксплуатации энергетических установок с парогенераторами из титановых сплавов ПТ-7, используемых в энергетическом секторе, ключевой проблемой является удаление прочно связанных поверхностных радиоактивных отложений. Диоксид титана TiO_2 сорбирует радионуклиды из теплоносителя первого контура ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{59}Fe , которые замещают атомы титана, образуя глубокое загрязнение. Со стороны второго контура, образуются магниевые и кальциевые силикаты, сульфаты, а также оксиды железа и меди. Применение радиохимических методов на основе агрессивных растворов кислот ограничено жесткими физико-химическими свойствами титана. Химическое травление оксидного слоя TiO_2 сопровождается диффузией атомарного водорода, что вызывает его охрупчивание. Основным недостатком радиохимической дезактивации является образование значительных объемов вторичных ЖРО и больших затрат на обращение с ними.

Мы разрабатываем сухую ионно-плазменную технологию дезактивации, физический принцип которой заключается в зажигании укороченного разряда в среде аргона между дезактивируемой поверхностью (катод) и электродом-коллектором (анод) распылительного устройства. Ионы аргона бомбардируют загрязненную поверхность титанового сплава и выбивают атомы поверхностного радиоактивного загрязнения без нагрева основного металла при выборе импульсного режима. Технология исключает образование ЖРО и предотвращает наводороживание титана, обеспечивая контролируемую дистанционную очистку оборудования, посредством рабочих параметров технологии: давление инертного газа (0.1-1) атм., плотность тока разряда (0.01-1) А/см², напряжение на разрядном промежутке (100-1000) В, разрядный промежуток (0.1-2) мм. Нами выполнен ряд экспериментов по распылению необлученного образца титанового сплава ТП-7 на вакуумной экспериментальной установке в «ИнноПлазмаТех» с последующим исследованием состояния поверхности титанового сплава на сканирующем электронном микроскопе Merlin Zeiss с X-ray микроанализом и EDS-детектором Oxford X-Max 80. Показано, что ионно-плазменная технология не разрушает поверхность титанового сплава в импульсном режиме при длительности воздействия укороченного разряда до 5 с. В перспективе внедрение технологии позволит осуществить рециклинг дезактивированного титанового сплава в высокотехнологичных отраслях, снижая себестоимость производства новых изделий. Технология ионно-плазменной дезактивации запатентована нами совместно с ГК «Росатом» и была представлена по приглашению МАТАТЭ на техническом совещании [1, 2].

Список источников

1. A. S. Petrovskaya, A. B. Tsyganov, PCT/RU2019/000816, EP 19888171.6, US 20210272715, CA3105179A1, CN112655056A (2019).
2. A. S. Petrovskaya, A. B. Tsyganov, Technical Meeting on Processing Technologies for Irradiated Graphite Waste (EVT2304219), IAEA Headquarters, Vienna (2024).

Цифровая модель процесса неразрушающего контроля положения пружины в ТВЭЛе гамма-абсорбционным методом

В. М. Вахтель, В. В. Дьячков, С. Д. Калинин, А. А. Писклюков*, П. В. Кострюков

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: pisklyukov@phys.vsu.ru

Обеспечение ядерной безопасности и эффективности работы реакторов требует надежного контроля состояния компонентов тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). Одним из таких компонентов является пружина, компенсирующая тепловое расширение и фиксирующая топливные таблетки. Для мониторинга ее положения необходим неразрушающий метод с временным разрешением порядка 0,001 с, позволяющий определять координаты начала и конца пружины внутри ТВЭЛа.

В данной работе представлена компьютерная модель, разработанная на основе пакета Geant4 [1]. Моделируется прохождение гамма-излучения через движущийся ТВЭЛ, рассчитывается взаимодействие гамма-квантов с материалами и определяется количество квантов, достигающих детектора, в зависимости от положения ТВЭЛа. Это дает возможность локализовать пружину в продольном направлении.

Для моделирования выбран энергетический диапазон 290–400 кэВ, обеспечивающий оптимальное сочетание проникающей и поглощающей способности. Источник гамма-излучения расположен вне ТВЭЛа, детекторы регистрируют прошедшее излучение.

Результаты моделирования показывают, что наличие пружины вызывает локальные изменения интенсивности прошедшего излучения, связанные с различием коэффициентов поглощения и рассеяния в материале пружины и окружающих компонентах [2]. Анализ профиля интенсивности позволяет идентифицировать начало и конец пружины по характерным пикам и спадам. Погрешность метода составляет не более 2–3 мм, что допустимо для практического контроля.

Разработанная модель подтверждает возможность эффективного неразрушающего контроля положения пружины в ТВЭЛе с использованием гамма-излучения выбранного диапазона.

Список источников

1. S. Agostinelli [et al.], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **506**(3), 250 (2003).
2. J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, «Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients», National Institute of Standards and Technology (1995).

Анализ влияния локальных неоднородностей топливной таблетки на прохождение гамма-излучения через ТВЭЛ

В. М. Вахтель, В. В. Дьячков, С. Д. Калинин, А. А. Писклюков*, П. В. Кострюков

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: pisklyukov@phys.vsu.ru

Обеспечение целостности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) требует выявления не только смещений конструкционных компонентов, но и внутренних дефектов топливных таблеток. Одним из распространенных видов дефектов являются локальные неоднородности, например, сколы – отсутствие части таблетки произвольной формы [1]. В работе рассматривается возможность обнаружения таких неоднородностей гамма-абсорбционным методом в условиях малой статистики регистрируемых частиц (около 10 гамма-квантов на одну секцию таблетки).

Используется компьютерная модель, разработанная ранее в среде Geant4 [2] для моделирования прохождения гамма-излучения через ТВЭЛ. В нее введена возможность задания в теле таблетки полости произвольной геометрии. Форма неоднородности моделируется в виде тетраэдра или многогранника, что позволяет приблизиться к реальной морфологии разрушения керамического топлива. Источник гамма-излучения расположен вне ТВЭЛа, детектор регистрирует прошедшее излучение в энергетическом диапазоне 290–400 кэВ.

Моделирование выполняется при ограниченной статистике – не более 10 зарегистрированных квантов на продольную секцию таблетки, что соответствует условиям экспресс-контроля. Для каждого состояния (эталонная таблетка и таблетка с неоднородностью) рассчитывается профиль интенсивности прошедшего излучения вдоль оси ТВЭЛа. Анализ проводится без усреднения, непосредственно по сырым данным детектора.

Результаты показывают, что даже при столь низкой статистике наличие неоднородности приводит к устойчивому локальному изменению числа зарегистрированных частиц в проекции дефекта. Характер изменения (снижение или повышение счета) зависит от ориентации скола относительно направления сканирования. Для тетраэдрических и многогранных форм дефекта выявлены характерные сигнатуры, позволяющие отличать неоднородность от статистического разброса. Показано, что при объеме дефекта от 5% объема таблетки метод сохраняет обнаружительную способность на уровне достоверности не менее 80%.

Разработанный подход может быть использован для неразрушающего контроля топливных таблеток в условиях жестких временных ограничений и низкой статистической обеспеченности измерений [1], [3]

Список источников

1. Л. И. Косарев, Н. Р. Кузелев, А. Н. Майоров [и др.]. Способ радиационного контроля плотности тепловыделяющих элементов // Авторское свидетельство СССР № 1124697 А1, 1991.
2. S. Agostinelli [et al.], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **506**(3), 250 (2003).
3. А. К. Горобец, А. Л. Семенов, Реализация гамма-абсорбционного метода для контроля распределения топлива в ТВЭЛах // Препринт НИИАР, Дмитровград, 1981. С. 3–5; 14–15.

Математическое моделирование методов определения Флюенса альфа-излучения источника, расположенного на сложной поверхности

В. М. Вахтель, С. Д. Калинин, А. А. Писклюков*, П. В. Кострюков

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

*e-mail: pisklyukov@phys.vsu.ru

При моделировании детектирующих систем с протяженными источниками или загрязненными радионуклидами поверхностями сложной формы критически важной задачей является корректный учет геометрических характеристик распределения источника и углового распределения альфа-частиц. В работе рассматривается подход к моделированию в среде Geant4 [1–3] равномерного (изотропного по полусфере) потока альфа-частиц с фиксированными энергиями с поверхности сложных трехмерных объектов, а также последующая регистрация излучения полупроводниковыми детекторами различной площади.

Исследуются три типа геометрических конфигураций источника, каждая из которых накладывает особенности на реализацию генерации начальных координат и направлений треков частиц. Первая конфигурация представляет собой шестигранный цилиндр, модельная геометрия которого приближена к гексагональным структурам. Вторая конфигурация – цилиндры круглого сечения различного диаметра, используемые для анализа влияния кривизны поверхности на эффективность регистрации. Третья конфигурация – цилиндр со сквозными полостями на боковой поверхности, моделирование которого требует нетривиальной параметризации поверхности для обеспечения равномерной генерации событий.

Основное внимание в работе уделено математическому моделированию на основе CAD-моделей. Разработан алгоритм равномерной генерации частиц на заданных поверхностях, учитывающий локальную ориентацию нормали для розыгрыша направления вылета альфа-частиц. Для полупроводникового детектора альфа-излучения заданы фиксированные энергетические диапазоны регистрации с учетом анализируемых спектров. В работе представлены результаты расчетов геометрической и полной эффективности регистрации, а также энергетических спектров в зависимости от конфигурации источника и его ориентации относительно детектора [4], [5].

Разработанные методы позволяют гибко задавать параметры источников произвольной геометрической формы и могут быть применены для высокоточного расчета характеристик детекторов в задачах экологического мониторинга, дезактивации загрязненного оборудования и планирования экспериментов в ядерной физике.

Список источников

1. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako [et al.], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. **506**(3), 250 (2003).
2. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis [et al.], IEEE Transactions on Nuclear Science. **53**(1), 270 (2006).
3. J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis [et al.], Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. **835**, 186 (2016).
4. В. И. Иванов, Курс дозиметрии : учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1988. 400 с.
5. В. А. Климанов, Е. А. Крамер-Агеев, В. В. Смирнов Дозиметрия ионизирующих излучений : учебное пособие. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. 740 с

Моделирование кросс-толка нейтронов в плотноупакованных сцинтилляционных сборках для экспериментов по множественности мгновенных нейтронов деления

О. В. Сидорова^{1,2*}, Ш. С. Зейналов¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*e-mail: sidorova@jinr.ru

В экспериментах по измерению множественности мгновенных нейтронов деления используется плотная упаковка детекторов для повышения геометрической эффективности. В таких системах возникает кросс-толк нейтронов — регистрация одного нейтрона в нескольких детекторах вследствие последовательного упругого рассеяния на протонах. В отличие от гамма-кросс-толка, нейтронный кросс-толк не может быть подавлен методами n/γ -разделения и представляет собой принципиально неустранимый фон, искажающий измеряемые распределения множественности. Ранее авторами были выполнены расчеты вероятностей нейтронного кросс-толка различной кратности для аналогичной геометрии [1].

В настоящей работе представлены новые результаты Монте-Карло моделирования нейтронного кросс-толка для 32-детекторной сферической сборки на основе жидких сцинтилляторов [2]. Модель включает упругое пр-рассеяние с изотропным угловым распределением в системе центра масс. Получены корреляционные карты энерговыделений в целевом и кросс-толковом детекторах, построенные по той же методике, что и для гамма-квантов, с использованием энергетической калибровки [3]. Проведено сравнение структуры гамма- и нейтронного кросс-толка при одинаковой геометрии. Обсуждается энергетическая структура нейтронного кросс-толка, ее отличие от гамма-случая, а также влияние порогов дискриминации на наблюдаемую вероятность кросс-толка. Приводятся количественные оценки потерь кросс-толка и полезных событий при различных уровнях дискриминации.

Список источников

1. O. V. Sidorova, Sh. S. Zeynalov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **88**, 1262 (2024).
2. Eljen Technology, EJ-301, EJ-309 Data Sheet. URL: <https://eljentechnology.com/products/liquid-scintillators/ej-301-ej-309>.
3. Sh. S. Zeynalov, O. V. Sidorova, D. B. Berikov [et al.], Eurasian J. Phys. Funct. Mater., in press.

Фемтосекундная лазерная система для исследования отклика сцинтилляторов γ -излучения

В. А. Симонова*, А. Д. Саввин, В. П. Митрохин, А. Е. Дормидонов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

*e-mail: vas@optoacoustics.ru

Для регистрации сверхбыстрых импульсов γ -излучения необходимы эффективные детекторы с субнаносекундным временем отклика. Распространенным типом детекторов γ -импульсов является детектор на основе сцинтилляторов, преобразующих ионизирующее излучение в световое, и фоточувствительного элемента. Разработка эффективного, быстрого и надежного сцинтиллятора является важной проблемой современной физики высоких энергий. Как правило одновременное достижение оптимальной чувствительности и скорости отклика сцинтиллятора является сложной задачей, требующей подбора оптимальных концентраций составляющих компонент. Для оперативного, быстрого и безопасного измерения импульсных характеристик тестируемого сцинтиллятора в данной работе предложено возбуждение люминесцирующих компонент сцинтиллятора лазерными фемтосекундными импульсами. Высокоинтенсивное фемтосекундное лазерное излучение трансформируется в объеме сцинтиллятора в сверхширокополосный источник накачки за счет множественной филаментации, что позволяет исследовать люминесцентные компоненты вне зависимости от спектра их поглощения. Для сравнения фотолюминесценции и радиолюминесценции измерены временные и спектральные отклики различных сцинтилляторов – пластиковых, неорганических, а также сцинтилляторов на основе коллоидных нанокристаллов. Данные о фотолюминесценции получены при накачке фемтосекундным титан-сапфировым лазером. Излучение собиралось по оптоволкну и направлялось на спектрометр видимого диапазона. Формируемая люминесценция регистрировалась одновременно спектрометром видимого диапазона и стрик-камерой с временным разрешением 5 пс. Спектры радиолюминесценции и временная динамика образцов сцинтилляторов исследованы также под воздействием импульсного рентгеновского излучения наносекундной длительности.

Математическое моделирование при исследовании материала для коллиматора смешанного гамма-нейтронного пучка циклотрона У-120

А. А. Сорокина^{1*}, Е. А. Селихова¹, Е. С. Сухих^{1,2}, М. М. Балачков¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Научно-исследовательский институт онкологии

Томского национального исследовательского медицинского центра РАН, Томск, Россия

*e-mail: aas282@tpu.ru

Нейтронная лучевая терапия является перспективным методом лечения радиорезистентных злокачественных новообразований, так как ключевыми преимуществами быстрых нейтронов являются высокое значение линейной передачи энергии и пониженная зависимость биологического эффекта от концентрации кислорода в ткани, что особенно актуально при лечении гипоксических опухолей [1–3]. На циклотроне У-120 (НИ ТПУ, г. Томск) – одном из немногих действующих терапевтических источников быстрых нейтронов в России, пучок формируется ядерной реакцией ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ при энергии дейтронов 13,6 МэВ. Однако на текущий момент развитие нейтронной терапии сдерживается высокой токсичностью для здоровых тканей из-за невозможности обеспечить конформное облучение при использовании коллиматоров с фиксированной геометрией (квадрат или прямоугольник). Разработка коллиматора с регулируемой геометрией требует выбора материала, одновременно эффективно ослабляющего гамма-излучение (требует высокого атомного номера) и замедляющего быстрые нейтроны (требует водородсодержащих сред). В соответствии с этим, целью данной работы является проведение математического моделирования для исследования материала коллиматора смешанного гамма-нейтронного пучка терапевтического канала циклотрона У-120.

С использованием кода PHITS (метод Монте-Карло) [4] создана численная модель формирующей системы циклотрона У-120, включающая бериллиевую мишень, железную защиту, полиэтиленовый блок и бетонную стену. Верификация модели проведена сравнением расчётного глубинного распределения поглощённой дозы в водном фантоме с экспериментом, расхождение составило не более 5%. Исследованы материалы для коллимации смешанных гамма-нейтронных пучков: полиэтилен, чистый вольфрам и композиты с объёмной долей вольфрама 10, 15 и 20%. Установлено, что композитные материалы с объёмной долей вольфрама от 10 до 15% обеспечивают оптимальный баланс между ослаблением гамма-излучения и замедлением нейтронов.

Разработанная верифицированная численная модель формирующей системы циклотрона У-120 создаёт основу для дальнейших исследований геометрии коллиматора и его материалов.

Список источников

1. О. В. Грибова, Ж. А. Старцева, В. В. Великая [и др.], Вопросы онкологии, **71**(5), OF–2372 (2025).
2. В. М. Головков, В. А. Лисин, Л. И. Мусабаева [и др.], Известия ВУЗов. Физика. **56**(11–3), 173 (2013).
3. Б. Ж. Мусабеков [и др.], Сибирский онкологический журнал. **22**(1), 11 (2023).
4. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto [et al.], J. Nucl. Sci. Technol. **61**, 127 (2024).

Подготовка малошумящего детектора на микроканальных пластинах для регистрации кумулятивных частиц в экспериментах на фиксированной мишени

Ю. В. Толстых*, Ф. Ф. Валиев, В. В. Вечернин, С. Н. Иголкин,
Н. И. Калиниченко, Н. А. Макаров, Г. А. Феофилов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: st106884@student.spbu.ru

Данная работа основана на теоретических идеях о существовании флуктонов – многонуклонных структур с повышенной плотностью внутри ядра [1]. Есть ненулевая вероятность, что в ядре, образовался флуктон, при этом в ядерных реакциях его существование будет сопровождаться вылетом кумулятивной частицы, которая обладает импульсом большим, чем тот импульс, который приобрела бы та же частица при рассеянии на одном нуклоне. Именно регистрация кумулятивной частицы позволяет нам предполагать о том, что в данном событии внутри ядра образовался флуктон [1].

Для регистрации кумулятивных частиц в экспериментах по релятивистским ядерным столкновениям на фиксированной мишени предлагается использование малошумящего детектора, основанного на микроканальных пластинах (МКП) [2]. Детектор на МКП – компактный детектор, обладающий высокой эффективностью регистрации минимально-ионизирующих частиц, высоким временным (<100 пс), устойчивостью к магнитным полям.

Повышение эффективности регистрации минимально-ионизирующих частиц получено за счет уменьшения порогов компараторов, на входы которых подаются сигналы с МКП. При этом, введение схемы совпадения обеспечивает подавление случайных фоновых сигналов [3]. Также в работе в оптимизированной конструкции детектора устранено влияние возможных внешних случайных синфазных электромагнитных наводок [3]. Разработанный малошумящий детектор на основе двух шевронных сборок МКП и схеме совпадений обеспечивает высокую эффективность регистрации минимально-ионизирующих частиц ($\sim 95\%$) и низкий уровень собственных шумов (10^{-3} имп/(с·см²)) [3].

Результаты работы использованы для разработки системы детекторов, состоящих из вакуумированных МКП на основе технологий компании BASPIK [4] и предназначенных для использования в качестве триггера кумулятивных событий.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

Список источников

1. В. В. Вечернин, дисс.. д-ра физ.-мат. наук. (2006).
2. Н. А. Макаров, Г. А. Феофилов, Н. И. Калиниченко [и др.], Bull. Rus. Acad. Sci.: Physics. **89** (3), 13 (2025).
3. Г. А. Феофилов, Ф. Ф. Валиев, Н. И. Калиниченко, направлена в ЭЧАЯ 31 октября 2025 г.
4. Каталог продукции «Баспик», Микроканальные электронные усилители. Устройство. Разновидности. Применение. (2023).

Реакции слияния тяжелых ядер для астрофизических задач

С. Ю. Торилов*, В. И. Жеребчевский, Н. А. Мальцев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: s.torilov@spbu.ru

На сегодняшний день, в физике ядерных реакций достигнут значительный прогресс описания сечения слияния в рамках потенциальной модели для случая взаимодействия ядер с протонами и нейтронами [1] и для взаимодействия тяжелых ядер при энергиях в области кулоновского барьера [2]. Тем не менее, до сих пор остается актуальным вопрос описания сечения слияния тяжелых ядер в глубоко подбарьерной области в рамках простых, часто полуфеноменологических, моделей. Ответ на данный вопрос даст возможность получить критерий для оценки вкладов в сечение при малых значениях энергий таких явлений, как подавление сечения (hindrance) и резонансо-подобных процессов. Как было показано ранее [3], описание сечения слияния тяжелых ядер возможно с применением широкого класса потенциалов, позволяющих воспроизвести сечение упругого рассеяния [4] и положения, для области наблюдаемых резонансов [5]. С другой стороны, было показано, что достаточно хорошее описание сечения слияния возможно в рамках простой модели прямоугольной потенциальной ямы и при этом параметры радиуса ямы и реальная часть потенциала допускают простую параметризацию с фиксированной глубиной ямы [6]. Такая параметризация позволяет описать сечение слияния ядер, важных с точки зрения астрофизики, и экстраполировать значения функции возбуждения на область гамовского окна [7]. Однако мнимая часть остается свободным параметром, хотя и лежащим в достаточно ограниченном диапазоне энергий. По этой причине, в представленной работе рассматривается случай слияния ядер в рамках модели связанных каналов с граничным условием, налагаемым на волновую функцию (IWBC) [8]. Применение данного подхода позволит избежать введения мнимого потенциала. Выбор потенциала с диффузностью позволяет устранить артефакты, связанные с применением модели прямоугольной ямы. В работе рассмотрены функции возбуждения для взаимодействующих ядер, встречающихся в описании звездного нуклеосинтеза, при энергиях ниже кулоновского барьера.

Список источников

1. A. J. Koning, J. P. Delaroche, Nucl. Phys. A **713**, 231 (2003).
2. G. P. A. Nobre, L. C. Chamon, L. R. Gasques [et al.], Phys. Rev. C **75**, (2007).
3. S. Yu. Torilov, N. A. Maltsev, V. I. Zherebchevsky, Bull. Russ. Acad. Scien.: Phys. **85**, 548 (2021).
4. S. Yu. Torilov, N. A. Maltsev, V. I. Zherebchevsky [et al.], Phys. Part. Nuc. **53**, 403 (2022).
5. S. Yu. Torilov, N. A. Maltsev, V. I. Zherebchevsky, Bull. Russ. Acad. Scien.: Phys. **86**, 966 (2022).
6. S. Yu. Torilov, N. A. Maltsev, V. I. Zherebchevsky, Bull. Russ. Acad. Scien.: Phys. **87**, 1217 (2023).
7. S. Yu. Torilov, N. A. Maltsev, V. I. Zherebchevsky, Int. J. Mod. Phys. E **2641018** (2026).
8. K. Hagino, N. Rowley, A. T. Kruppa, Comp. Phys. Comm. **123**, 143 (1999).

Характеристики α -распада неизвестных ядер в области $Z \geq 100$

В. С. Ульянова¹, Д. Ф. Байрамов¹, С. В. Сидоров², М. Е. Степанов¹, К. А. Стопани², Т. Ю. Третьякова^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Россия

*e-mail: ulianova.vs22@physics.msu.ru

Изучение трансфермиевых элементов важно с точки зрения понимания границ существования атомных ядер. На данный момент открыты элементы до $Z = 118$, однако для исследования вопросов изменения структуры и динамики ядер в этой области необходимо как увеличение статистики по уже открытым нуклидам, так и синтез неизвестных изотопов. Альфа-распад является одной из доминирующих мод распада тяжелых ядер и детектирование сверхтяжелых изотопов происходит по цепочкам альфа-распадов [1].

Наша работа посвящена предсказанию энергии Q_α и периода полураспада по альфа-каналу в рамках феноменологических подходов. Ранее мы провели оценку Q_α для изотопов с $100 < Z < 106$ с использованием предсказаний масс атомных ядер на основе феноменологического метода локальных массовых соотношений [2]. Данный метод прост в реализации, но тем не менее дает хорошие предсказания, поскольку использует уже известные массы соседних изотопов. Соответственно, область применимости таких методов ограничена наличием экспериментальных данных.

В области сверхтяжелых экспериментальные значения масс ограничены $Z = 110$ и $N = 160$, но для более тяжелых изотопов есть данные по Q_α и временам жизни. С использованием локальных соотношений для энергий α -распада мы провели оценки значений Q_α для неизвестных ядер в области $100 \leq Z \leq 118$. Для оценок использовались как данные из компиляции АМЕ2020, так и современные экспериментальные данные из других работ [3].

Значительный рост экспериментальной информации по временам жизни приводит также к необходимости корректировки феноменологических формул, используемых для оценки периода полураспада по α -каналу T_α . Мы рассмотрели некоторые из формул и провели подгонку параметров с использованием современных экспериментальных данных. С учетом новых параметров наилучшее согласие с экспериментом было получено для формулы Виолы-Сиборга [4]. На основе предсказанных значений Q_α с использованием новой параметризации формулы Виолы-Сиборга рассчитаны периоды полураспада по альфа-каналу для неизвестных изотопов.

Список источников

1. Yu. Ts. Oganessian, A. Sobiczewski, G. M. Ter-Akopian, Phys. Scr. **92**, 02300 (2017).
2. E. V. Vladimirova [et al.], Int. J. Mod. Phys. E. **30**, 2150025 (2021).
3. D. Ackermann, Prog. Part. and Nucl. Phys. **147**, 104215 (2026).
4. V. E. Viola, G. T. Seaborg, J. Inorg. Nucl. Chem. **28(3)**, 741 (1966).

Влияние тензорных сил на нейтронную шубу в изотопах олова

А. Р. Хайруллин^{1*}, С. В. Сидоров², Т. Ю. Третьякова¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия,

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: hayrullinAR@my.msu.ru

Одним из наиболее успешных подходов к описанию микроскопической структуры ядра является метод Хартри-Фока с взаимодействием Скимма (SHF) [1]. Сильной стороной данного подхода является возможность отдельного включения тех или иных членов взаимодействия, что позволяет изучать их влияние на структуру ядра. Исследования в области изотопов с большим избытком протонов или нейтронов указывают на важность учета тензорных сил при описании эволюции одночастичной структуры ядер. В частности, поскольку тензорное взаимодействие оказывает влияние на спин-орбитальное расщепление нуклонных уровней, его присутствие может сказываться на образовании нетипичных магических чисел вдали от линии стабильности. Среди важных характеристик, которые потенциально могут зависеть от характера тензорных сил, можно также выделить величину нейтронной шубы. Последствия такого воздействия могут проявляться, например, в структуре коллективных возбуждений, таких как гигантские дипольные резонансы.

Настоящая работа посвящена изучению влияния тензорных сил на характеристики изотопов олова ($Z = 50$). Расчеты проводились в подходе SHF при учете парных корреляций в модели Бардина-Купера-Шриффера (BCS). Ряд наиболее популярных взаимодействий (SLy4, SLy5, SGII, SAMi) и их вариации, включающие тензорные силы, использованы для изучения влияния тензорных сил на одночастичную структуру изотопов олова. Показано, что выбор тензорных сил оказывает существенное влияние на динамику заселения одночастичных состояний, что может сказываться на величине нейтронной шубы.

Study of the correlation function between cells in the HGND at the BM@N experiment

A. Shabanov^{1*}, V. Bocharnikov², M. Golubeva¹, F. Guber¹, N. Karpushkin^{1,3}, S. Morozov¹,
P. Parfenov^{1,3}, I. Pshenichnov¹, A. Zubankov^{1,4}

¹ Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

² High School of Economics University, Moscow, Russia

³ Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

⁴ Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia

*e-mail: arseniy.shabanov@phystech.edu

The BM@N experiment (JINR, Dubna) studies heavy-ion collisions at energies up to 4.5 GeV per nucleon. To expand the physics program of BM@N, the Highly Granular Neutron Detector (HGND) [1] is being developed for the measurements of neutron spectra in the range 0.3–6 GeV. The HGND design comprises two arms, each with 7 layers of plastic scintillator cells with a copper converter in between. An additional scintillator veto layer placed in front of the detector suppresses charged particles. Each scintillator layer is an 11×11 matrix of cells with individual readout. The time-of-flight base is 7 m, and the time resolution is about 150 ps.

A single particle hitting the HGND causes several cells to fire simultaneously. Multiple particles can also be registered in a single event. Hits from one particle are correlated in time, whereas hits from different particles show independent time distributions. By studying pairwise correlations between detector cells, one can determine the time resolution of individual cells and the geometric patterns of particle hits.

This talk presents an algorithm for determining the mutual correlation function between HGND cells. The mixed-event method was used to account for the uncorrelated background. The algorithm was validated with data from Monte Carlo simulations of the BM@N setup. It is shown that the algorithm can be applied to the time calibration of the detector under real experimental conditions.

References

1. S. Morozov [et al.], Nucl. Instrum. Meth. A **1072**, 170152 (2025).

Contents

Пленарные доклады Plenary talks	3
<i>Aparin A., Patsyuk M.</i> Physics opportunities for the fixed-target experiment at the Nuclotron with the SRC detector setup	4
<i>Балдин А. А.</i> Коллаборация FLAP: задачи и перспективы	5
<i>Варламов В. В., Давыдов А. И., Орлин В. Н.</i> Эксперименты на пучках фотонов: проблемы и перспективы	6
<i>Воронин В. В.</i> Международный центр нейтронных исследований на базе реактора ПИК ...	7
<i>Гаганов В. В., Вершинин И. С., Долгополов А. В.</i> Стенд для исследования световых органических сцинтилляторов: результаты эксперимента с генератором ДТ-нейтронов	8
<i>Jolos R. V., Kolganova E. A.</i> Quasimagic nuclei and pseudospin symmetry	9
<i>Дзюба А. А., Арутюнова А. Ю., Грузинский Н. В., Добровольский А. В., Карпухина П. И., Кравченко П. В., Маев Е. М., Маев О. Е., Миклухо О. В., Родионов К. А., Фетисов А. А., Фотьев В. Д., Чубыкин А. Д., Аламури А.</i> Программа исследований структуры нуклонов и атомных ядер методом активной мишени	10
<i>Efimov A. D., Koval I. V., Izosimov I. N.</i> Description of backbending in even Pu nuclei	11
<i>Жеребчевский В. И., Мальцев Н. А., Феофилов Г. А., Комарова Д. А., Кострыгина А. М., Петров В. В., Прокофьев Н. А., Скалецкий А., Торилов С. Ю., Землин Е. О.</i> Ядерная физика и диагностика	12
<i>Kartavtsev O. I.</i> Few-body systems with singular (zero-range) interactions: some aspects of correct formulation and related problems	13
<i>Kim Victor T.</i> Spin Physics Detector (SPD) at the NICA collider: status and outlooks	14

Коваленко В. Н., Феофилов Г. А., Жаров М. А. Эффекты нарушения изотопической симметрии в ядерных столкновениях на SPS и NICA	15
Kolupaeva L. D. Overview on progress in neutrino physics	16
Larionova D. Status and physics program of the NICA-MPD experiment at JINR	17
Lednicky R. First results and plans of the BM@N experiment at NICA	18
Лубсандоржиев Б. К. Проект компактного многозадачного нейтринного детектора на основе галлий содержащих сцинтилляторов	19
Любашевский Д. Е., Титова Л. В., Ключников С. В., Щербина Ю. Д., Шашкина Т. Ю. Механизмы формирования спинов и угловые распределения фрагментов деления: Bending- и Wiggling-корреляции	20
Мочалов В. В. (от имени коллаборации СПАСЧАРМ) Исследования спиновых эффектов на ядерных мишенях в эксперименте СПАСЧАРМ	21
Nesterenko V. O. Exotic E1 resonances in nuclei	22
Prusachenko P. S., Fedorov N. A., Kopatch Yu. N., Grozdanov D. N., Andreev A. V. Nuclear data in Russia: current status and possible prospects	23
Pshenichnov I. A., Iusupova P. A., Savenkov S. D., Svetlichnyi A. O. Probing nuclear structure with spectator nucleons from collisions of relativistic nuclei	24
Родкин Д. М., Чувильский Ю. М. Исследование реакций радиационного захвата протона на ядрах p- и sd-оболочки в рамках высокоточных оболочечных моделей	25
Свирихин А. И. Изучение свойств тяжелых и сверхтяжелых ядер в ЛЯР ОИЯИ	26
Сидорчук С. И. Экспериментальные исследования ядерной структуры. Лаборатория ядерных реакций имени Г. Н. Флерова	27

Сорокиков М. Н. (от имени коллаборации Baikal-GVD) Нейтронный телескоп BAIKAL-GVD: статус и основные физические результаты	28
Титова Л. В., Любашевский Д. Е., Кострюков П. В., Отводенко Я. О. Спонтанное и низкоэнергетическое вынужденное тройное деление ядер-актинилов: механизмы процесса и характеристики продуктов тройного деления	29
Chepurinov A. S. (on behalf of the JUNO collaboration) JUNO experiment: status report and perspectives	30
Черняев А. П., Лыкова Е. Н., Щербаков А. А., Студеникин Ф. Р., Ким А. А. Актуальные проблемы развития ядерно-физических технологий для медицины и промышленности	31
Чувильский Ю. М., Родкин Д. М. Восьминуклонные системы под <i>ab initio</i> микроскопом: спектры, кластеризация, распад и резонансные ядерные реакции	32
Камерджиев С. П., Шитов М. И. Обобщенная теория конечных ферми-систем: формализм, анализ и оценки новых эффектов	33
Бредихин И. С. Производимые и поставляемые ООО «Гамматек» системы: (ОЧГ-, CZT-, сцинтилляционные) – спектрометры, альфа-спектрометры, а также ФЭУ, Si-ФЭУ и модули электроники для построения научного эксперимента	34
Паиков А. В. Новые возможности отечественных диджитайзеров для задач ядерной физики	36
Секция 1. Экспериментальные и теоретические исследования свойств атомных ядер Section 1. Experimental and theoretical studies of nuclear reactions	37
Arsenyev N. N., Severyukhin A. P., Usman I. T. Fine structure in giant resonances	38
Арутюнова А. Ю., Дзюба А. А., Маев Е. М. Новый экспериментальный метод изучения кластерной структуры ядер с помощью активной мишени	39

Безбах А. Н., Адамьян Г. Г., Антоненко Н. В. Анализ альфа-распадных цепочек элементов 119 и 120 в двухцентровой оболочечной модели: конкуренция незапрещённых и запрещённых переходов	40
Беспалова О. В., Блохинцев Л. Д., Мосунов М. М., Савин Д. А. Расчет асимптотических нормировочных коэффициентов для нестабильных изотопов олова с нуклонным потенциалом дисперсионной оптической модели	41
Быстряков А. Д., Васильев С. И., Зинатулина Д. Р. GEANT4-моделирование экспериментальной установки «Монумент». Выбор оптимальной толщины мишени $^{136}\text{BaCO}_3$ в исследовании обычного мюонного захвата	42
Voinov A. A., Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Solovyev D. I., Abdullin F. Sh., Ibadullayev D., Itkis M. G., Kovrizhnykh N. D., Kuznetsov D. A., Petrushkin O. V., Podshibiakin A. V., Polyakov A. N., Popeko A. G., Sagaidak R. N., Schlattauer L., Shubin V. D., Shumeiko M. V., Tsyganov Yu. S., Sabelnikov A. V., Abdusamadzoda D., Bodrov A. Yu., Voronyuk M. G., Bozhikov G. A., Aksenov N. V., Khalkin A. V., Gan Z. G., Zhang Z. Y., Huang M. H., Yang H. B., Wang J. G., Zhang M. M., Huang X. Y. Exploring the superheavy nuclei using ^{50}Ti and ^{54}Cr beams	43
Wang Y., Bogdanov O. V., Rasulova F. A., Yang Y. The method for verifying the enhancement of multipole transitions by vortex photons via activity measurement	44
Власников А. К., Гусев И. С. Проверка CVC-гипотезы и унитарности матрицы СКМ на основе анализа скорректированных значений Ft для сверхразрешённых β -переходов	45
Izosimov I. N. Wigner's SU(4) spin-isospin symmetry and MNT & fragmentation nuclear reactions	46
Калугин Н. К. (эксперимент СПАСЧАРМ) Измерение выстроенности $K^{*-}(892)$ -мезонов, образованных в каон-ядерных и пион-ядерных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70	47
Kosarev M. S., Arsenyev N. N., Severyukhin A. P. Gamma de-excitation of $^{90\text{m}}\text{Zr}$ isomer	48
Любашевский Д. Е., Янь Цзе, Кострюков П. В., Зайчиков В. В. Устойчивость оболочечной структуры сверхтяжёлых ядер в деформированных потенциалах Нильсона и Вудса–Саксона	49

Mazur I. A., Kim Y., Smirnova N. A., Shin I. J., Shirokov A. M. <i>Ab initio</i> no core shell model calculations of <i>sd</i> -shell nuclei	50
Mardyban E. V., Rahmatinejad A., Shneidman T. M., Adamian G. G., Antonenko N. V. Isotopic dependence of the fission threshold in nuclei with $z=114$ and $z=120$...	51
Mardyban M. A., Nesterenko V. O. Scissors mode in ^{254}No	52
Кострыгина А. М., Митропольский И. А. Одночастичная структура изомерных состояний сферических ядер	53
Моисеев Н. С., Антоненко Н. В., Адамян Г. Г. Эмпирическая систематика периодов полураспада спонтанного деления и альфа-распада тяжелых и сверхтяжелых ядер	54
Molodtsova I. V. Transition densities of spin-dipole excitations in ^{208}Pb	55
Пермяков Е. А., Поташев С. И., Мазур И. А., Каспаров А. А., Караевский С. Х. Экспериментальная и расчетная зависимости коэффициента внутренней конверсии электрон-позитронной пары от угла их разлета при испускании ее из высоковозбужденного ядра $^8\text{Be}^*$	56
Plekhanov V. G. Measuring the dependence of proton-neutron interaction on the distance between them	57
Ф. А. Расулова, А. А. Кузнецов, В. О. Нестеренко, Ж. Х. Хушвактов, С. И. Алексеев, Н. Ю. Фурсова, А. Ш. Мадумаров, И. Чупраков, С. С. Бельшев, Н. В. Аксенов Изоспиновое расщепление гигантского дипольного резонанса на средних и тяжелых ядрах	58
Pomerantsev V. N., Kakenov M. B., Rubtsova O. A. Properties of two-nucleon momentum distributions for $A=6$ nuclei found within three-cluster model	59
Samarin V. Study of spatial structures in α -cluster nuclei with valence neutrons	60
Severyukhin A. P., Arsenyev N. N., Severyukhina V. A. The β -delayed γ -transitions of neutron-rich nuclei	61

<i>Smoliannikov D. Yu., Arsenyev N. N., Severyukhin A. P., Usman I. T.</i> Skyrme-type energy density functional with surface-peaked effective mass	62
<i>Калинников В. Г., Авдеев С. П., Бармина Е. В., Белов О. В., Ваганов Ю. А., Карч В., Картавенко В. Г., Кобец В. В., Розов С. В., Симакин А. А., Стегайлов В. И., Щербаков И. А., Шакур Н. Г.</i> Экспериментальные исследования и теоретическое обоснование изомерии и структуры нечетно-нечетных ядер гольмия и европия в переходной области деформаций (N=89–93)	63
<i>Стовпец Д. Е., Джолос Р. В.</i> Исследование структуры ядер с квадруполь-октупольной деформацией	64
<i>Третьякова Т. Ю., Сидоров С. В., Степанов М. Е., Стопани К. А.</i> Остаточное нейтрон-протонное взаимодействие и локальные массовые соотношения	65
<i>Усманов П. Н., Изосимов И. Н., Юсупов Э. К., Махмудов Ж. Б.</i> Коэффициенты $\delta(E2/M1)$ для переходов из вибрационных состояний в $^{182,184}\text{W}$	66
<i>Фомина М. В. (от коллаборации MONUMENT)</i> Мюонный захват на ядре ^{136}Ba	67
<i>Чуйкина А. В., Кузнецов А. А., Фурсова Н. Ю.</i> Фотоядерные реакции на природном молибдене при энергии тормозного излучения 25 МэВ	68
<i>Sharypov R. E., Mazur A. I., Shirokov A. M., Li He</i> Neural Network Extrapolation of NCSM Results for the ^{17}C Nuclear Spectrum ...	69
Секция 2. Экспериментальные и теоретические исследования ядерных реакций	70
Section 2. Experimental and theoretical studies of nuclear reactions	
<i>Andreev A. V., Fedorov N. A., Tretyakova T. Yu., Kopatch Yu. N., Filonchik P. G., Barabanov A. L., Prusachenko P. S., Grozdanov D. N., Mataeva K. O., Kharlamov P. I., Hramco C. (and TANGRA collaboration)</i> Theoretical calculation of the angular anisotropy of gamma radiation on carbon, chromium and iron nuclei in inelastic neutron scattering	71
<i>Sajia Iffat, Nishat Tasnim, Shuva Saha, M. Nure Alam Abdullah</i> Potential description of $\alpha+^{197}\text{Au}$ elastic scattering	72
<i>Адоньев С. Р., Желтоножская М. В., Черняев А. П.</i> Исследование протон-индуцированных реакций на висмуте-209	73

Безбах А. А., Головков М. С., Горшков А. В., Князев А. Г., Крупко С. А., Лонг Ф., Мадонсела Р., Май А., Макинде А., Турар Р., Чжу Х. Измерение угловых распределений распада ^7He , заселяемого в реакции $^6\text{He}(d, p)$	74
Галюзов А. А., Косов М. В. Описание дифференциальных сечений упругого рассеяния изотопов водорода в теории прямых ядерных реакций	75
Goncharenko I. A., Westerdale S., Gromov M. B. Neutron yield uncertainty calculations for (α, n) reactions using the NeuCBOT program	76
Grozdanov D. N., Fedorov N. A., Prusachenko P. S., Kopatch Yu. N., Skoy V. R., Ruskov I. N., Tretyakova T. Yu., Kharlamov P. I., Andreev A. V., Hramco C., Filonchik P. G. (and TANGRA collaboration) Measurements of the gamma-ray emission cross sections and angular distributions from (n, γ) reactions with 14.1 MeV neutrons	77
Егоров М. В. Мультикластерная реализация задачи трёх тел на примере ядерных реакций с лёгкими ядрами	78
Варламов В. В., Давыдов А. И., Орлин В. Н. Особенности фоторасщепления изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$	79
Буртебаев Н., Демьянова А. С., Гончаров С. А., Насурлла Маулен, Данилов А. Н., Насурлла Маржан, Ходжаев Р. А., Исаев Д. А., Дмитриев С. В., Мурашов К. О., Леонова Т. И., Турганова С. А. Анализ рассеяния дейтронов на ядре ^{13}C в области энергий 13–18 МэВ: структура возбуждённых состояний и нейтронное гало	80
Буртебаев Н., Демьянова А. С., Гончаров С. А., Насурлла Маулен, Данилов А. Н., Насурлла Маржан, Ходжаев Р. А., Исаев Д. А., Дмитриев С. В., Мурашов К. О., Леонова Т. И., Турганова С. А. Анализ реакции срыва $^{13}\text{C}(d, t)^{12}\text{C}$ в области энергий 13–18 МэВ: определение асимптотических нормировочных коэффициентов и структуры состояний ядра ^{12}C	81
Демичев М. А. Измерение выхода фотоядерной реакции $(\gamma, p5n)$ на ядре висмута	82
Izosimov I. N. Excitation and decay of the Gamow-Teller resonance and its satellites in compound nuclei	83

Kamanin D. V., Pyakov Yu. V., Solodov A. N., Zhuchko V. E., Goryainova Z. I., Strekalovsky O. V., Kuznetsova E. A., Zhukova A. O., Sereda Yu. M., Vilane T. H., Ngcobo P. Z., Le B. A. Status of research on fissioning isomers in the fragments of binary fission of heavy nuclei	84
Karanfil E. C., Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Solovyev D. I., Abdullin F. Sh., Adamian G. G., Ibadullayev D., Itkis M. G., Kovrizhnykh N. D., Kuznetsov D. A., Petrushkin O. V., Podshibiakin A. V., Polyakov A. N., Popeko A. G., Rogov I. S., Sagaidak R. N., Schlattauer L., Shubin V. D., Shumeiko M. V., Tsyganov Yu. S., Voinov A. A., Sabelnikov A. V., Abdusamadzoda D., Bodrov A. Yu., Voronyuk M. G., Bozhikov G. A., Aksenov N. V., Khalkin A. V., Gan Z. G., Zhang Z. Y., Huang M. H., Yang H. B., Wang J. G., Zhang M. M., Huang X. Y. $^{237}\text{Np} + ^{48}\text{Ca}$ reaction and decay properties of ^{282}Nh and descendant nuclei at DGFRS-2	85
Ким А. А., Желтоножская М. В., Черняев А. П. Фотоядерные реакции с вылетом протонов на изотопах эрбия	86
Kulikov V. A., Du W., Sharaf M. A., Shirokov A. M., Yanikov U. M. <i>AB INITIO</i> description of scattering	87
Любашевский Д. Е., Титова Л. В., Якунин Д. А., Рябцева М. И. Моменты инерции bending-моды и их влияние на спины фрагментов деления	88
Макаров Д. Е., Григоренко Л. В., Хирк М. С., Шаров П. Г. Изучение механизмов выбивания нейтрона в реакции $^9\text{Be}(^7\text{Be}, ^6\text{Be})\text{X}$ при промежуточной энергии	89
Mikhailova T. I., Erdemchimeg B. Modeling of isotopic scaling and target ratio in transport statistical approach	90
Молоторенко К. Д., Ажибеков А., Лукьянов С. М., Маслов В. А. Роль нейтронного избытка в механизмах передачи нуклонов в реакциях тяжелых ионов $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$	91
Макаров Д. Е., Музалевский И. А., Безбах А. А., Белогуров С. Г., Вольский Р., Головков М. С., Горшков А. В., Григоренко Л. В., Каминьский Г., Князев А. Г., Крупко С. А., Куинь А. М., Никольский Е. Ю., Парфенова Ю. Л., Рымжанова С. А., Сидорчук С. И., Слепнев Р. С., Степанцов С. В., Фомичев А. С., Хамидуллин Б. Р., Хирк М. С., Шаров П. Г. Исследование рассеяния ^6He - ^4He на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 ...	92

<i>Stukalov S. S., Sobolev Yu. G., Samarin V. V., Naumenko M. A., Burtebayev N., Danilov A. N., Demyanova A. S., Dmitriev S. V., Nassurlla M., Shakhov A. V.</i>	
Experimental studies of $^{10}\text{B}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})^9\text{B}$ transfer reaction at 58 MeV	93
<i>Поташев С. И., Драчев А. И., Каспаров А. А., Караевский С. Х., Мазур И. А., Пермьяков Е. А., Пономарев В. Н., Сахаров А. Н., Разин В. И.</i>	
Экспериментальный поиск аномалии при снятии возбуждения ядра $^8\text{Be}^*$ с испусканием электрон-позитронной пары в реакции взаимодействия нейтронов с энергией свыше 20 МэВ с ядром ^{10}B	94
<i>Расулова Ф. А., Кузнецов А. А., Нестеренко В. О., Хушвактов Ж. Х., Алексеев С. И., Фурсова Н. Ю., Мадумаров А. Ш., Чупраков И., Белышев С. С., Аксенов Н. В.</i>	
Изоспиновое расщепление гигантского дипольного резонанса на средних и тяжелых ядрах	95
<i>Ryzhkov N., Shneidman T., Rahmatinejad A., Antonenko N., Adamian G.</i>	
Analytical approach to the generation of angular momentum in spontaneous fission fragments	96
<i>Соловьев А. С.</i>	
Полный и парциальные астрофизические S -факторы реакции $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$ в микроскопическом кластерном подходе	97
<i>Титова Л. В., Юдаков А. Д., Габитов А. Р., Шайкина А. А.</i>	
Определение вероятностей формирования предразрывных конфигураций в тройном делении ядер	98
<i>Tran T. N., Paraipan M., Abduvaliev A., Balabekyan A., Belov O. V., Ergashev F. H., Javadova V. M., Korneev S. V., Kostov L. K., Khushvaktov J. H., Kulikov S. A., Solnyshkin A. A., Sorokin V. V., Tyutyunnikov S. I.</i>	
Theoretical and experimental investigation on the optimization of accelerator driven subcritical reactors	99
<i>Уланова И. И., Исаев А. В., Изосимов И. Н., Камински Г., Малышев О. Н., Мухин Р. С., Попов Ю. А., Сокол Е. А., Солнцев А. М., Свирихин А. И., Чепигин В. И.</i>	
Время-проекционная камера для исследования характеристик спонтанного деления сверхтяжелых ядер	100
<i>Ivanskiy Y., Unzhakov A.</i>	
Multi-agent modeling of collective dynamics in heavy nuclei fission	101

<i>Fedorov N. A., Grozdanov D. N., Prusachenko P. S., Kopatch Yu. N., Skoy V. R., Ruskov I. N., Tretyakova T. Yu., Kharlamov P. I., Andreev A. V., Hramco C., Filonchik P. G. (and TANGRA collaboration)</i> Development of the evaluated cross sections database for (n, x γ)-type reactions ...	102
<i>Shakhov A. V., Azhibekov A. K., Lukyanov S. M.</i> Multinucleon transfer reactions in ^7Li , ^{12}C , ^{40}Ar , $^{40,48}\text{Ca}$ + ^{197}Au	103
<i>Шевчик Е. А. (от коллаборации LEGEND)</i> Активная аргоновая защита в низкофоновых экспериментах по поиску двойного безнейтринного бета-распада GERDA и LEGEND	104
<i>Shehada A., Zinatulina D.</i> Comparative study of simulated and measured isotope production in target and HPGe detector in muon capture experiments	105
<i>Яников У. М., Куликов В. А., Широков А. М.</i> Учет кулоновской асимптотики в формализме осцилляторного представления теории рассеяния	106
Секция 3. Современные ядерно-физические методы, технологии и установки	107
Section 3. Modern nuclear physics methods, technologies and facilities	
<i>Бурякова Е. К., Сажнов В. В., Тесаловский Н. А., Щеглов А. А.</i> Результаты экспериментов с тепловыми трубами с цезиевым теплоносителем	108
<i>Веденеев В. Ю., Родин А. М., Новоселов А. С., Гуляев А. В., Гуляева А. В., Комаров А. Б., Подшибякин А. В., Саламатин В. С., Чернышева Е. В., Юхимчук С. А.</i> Криогенная газовая ячейка охлаждения ионов. Особенности конструкции, вакуумная система, система газового обеспечения, система охлаждения	109
<i>Данилкин В. Д., Свирихин А. И., Малышев О. Н., Попов Ю. А., Попеко А. Г.</i> Моделирование ионной оптики сепаратора STAR с помощью программы SHEMAT	110
<i>Евсеев С. А., Гуров Ю. Б., Довбненко М. С., Замятин Н. И., Копылов Ю. А., Розов С. В., Грубчин Л., Затько Б.</i> Исследование радиационной стойкости SiC- и Si-детекторов после облучения альфа-частицами	111
<i>Зимин И. Ю., Кузьмин Е. С., Бокучава Г. Д., Круглов А. А., Малышев В. Л.</i> Нейтронные сцинтилляторы на основе кристалла ZnS(Ag)	112

Канцырев А. В., Алексеев И. Г., Скобляков А. В., Колесников Д. С., Голубев А. А., Богданов А. В., Высоцкий С. А., Волков В. А., Гаврилин Р. О., Ладыгина Е. М., Лапшин М. А., Панюшкин В. А., Самигуллин Э. И., Тарковский Е. И., Хурчиев А. О., Загоруйко А. С. Мюонная томография крупномасштабных объектов с применением компактных цилиндрических позиционно-чувствительных детекторов	113
Каретников М. Д. Нейтрон-нейтронные методы дистанционного контроля с использованием меченых нейтронов	114
Ковалев М. Б. Исследование эффекта наложения сигналов (pile-up) при регистрации атмосферных мюонов в нейтринном телескопе Baikal-GVD	115
Лашин К. С. Реконструкция плотности многокомпонентных объектов в протонной радиографии с использованием метода роя частиц и преобразования Абеля ...	116
Мальцев Н. А., Жеребчевский В. И., Землин Е. О., Петров В. В., Прокофьев Н. А., Скалецкий А. О. Особенности изучения свойств пучков тяжёлых ионов высоких энергий	117
Новоселов А. С., Родин А. М., Веденеев В. Ю., Гуляев А. В., Гуляева А. В., Комаров А. Б., Когоут П., Когоутова А., Подшибякин А. В., Саламатин В. С., Сизов Д. А., Чернышева Е. В., Юхимчук С. А. Измерение времени экстракции ионов из криогенной газовой ячейки охлаждения	118
Олейников В. П., Бакулев М. А., Бондарь А. Е., Быков Т. А., Громов М. Б., Касатов Д. А., Лизунов А. А., Михеев Т. С., Носов В. В., Соколов А. В., Соколова Е. О., Старцев Н. Д., Таскаев С. Ю., Чашин С. М., Чепурнов А. С. Измерение ионизационных выходов ядер отдачи в аргоне	119
Petrov G. E., Soldatov E. Yu. Development of machine learning tool for photon identification using the electromagnetic calorimeter at SPD detector	120
Розов С. В., Евсеев С. А., Казалов В. В., Пономарев Д. В., Якушев Е. А., Камнев И. И., Казарцев С. В., Горшков Н. С., Антохина К. В. Низкофоновый детектор нейтронов на основе гелия-3	121
Семенов С. В., Осипов А. М., Цыганов С. В., Вуколова А.-Н. В., Пекшев А. Н. Критический стенд «П»: современное состояние, особенности и роль исследований для развития технологии ВВЭР	122

Сидорова О. В., Зейналов Ш. С. Физическая структура кросс-толлка гамма-квантов в сферических МНГО-детекторных сцинтилляционных системах	123
Скобляков А. В., Загоруйко А. С., Канцырев А. В., Алексеев И. Г., Голубев А. А. Виртуальный генератор потока атмосферных мюонов в варьируемом диапазоне энергий до 100 ТэВ.....	124
Smirnov I. B. Average spatial resolution of detector layers of four-layer position-sensitive detectors	125
Стрекаловский О. В., Жукова А. О., Жучко В. Е., Солодов А. Н., Середа Ю. М. Применение диджитайзеров CAEN-XX42 для регистрации заряженных частиц	126
Strizhak A., Baranov A. Performance and light yield of CSI(PURE) scintillation module prototypes at LN ₂ temperature	127
Суслов И. А., Немченко И. Б., Швецов В. Н., Нуруев С., Камнев И. И., Быстрыков А. Д., Козин Т. М. Пластмассовые сцинтилляторы с возможностью разделения частиц по форме импульса	128
Цыганкова В. И., Петров Д. В., Павлюков Г. К., Вартамян С. Л. Влияние ²²² Rn на расчёт радиоуглеродного возраста древесных углей	129
Шимко П. А., Золотов С. А., Близнюк У. А., Родин И. А., Черняев А. П. Исследование распределения поглощённой дозы в полимерных материалах при облучении ускоренными электронами	130
Секция 4. Релятивистская ядерная физика, физика элементарных частиц и физика высоких энергий	131
Section 4. Relativistic nuclear physics, particle physics and high-energy physics	
Avdeyev S. P., Karcz W., Igamkulov Z., Milnov G. D., Rukoyatkin P. A., Stegaylov V. I., Botvina A. S. Source velocity in collisions of 2.1 GeV and 3.6 GeV protons with gold target ...	132
Andronov E. V., Simonova M. D. Influence of color string configurations on rapidity multiplicity correlations	133

Ануфриев А. В., Коваленко В. Н. Исследование выходов заряженных адронов в рамках гидродинамического моделирования с применением голографического уравнения состояния	134
Белокурова С. Н. Применение классического глауберовского подхода к описанию дейтрон-дейтронного взаимодействия.....	135
Bikmetov N., Parfenov P., Taranenko A. Investigation of nuclear deformation influence on anisotropic flows in heavy-ion collisions at NICA energies	136
Vasilieva A. P. Analysis of charged and identified hadron spectra with Tsallis distributions in O+O, Kr+Kr and Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6$ GeV using the UrQMD model	137
Вечернин В. В., Юрченко С. В. Кумулятивные явления в области больших поперечных импульсов и их наблюдение в столкновениях ядер на коллайдере NICA	138
Галактионов К. А., Руднев В. А., Валиев Ф. Ф. Исследование нейросетевых подходов к оценке прицельного параметра в столкновениях тяжелых ионов на основе 4 π информации о событии	139
Герасименюк Н. В., Чернодуб М. Н., Гой В. А., Молочков А. В. Экранирование заряда в многокомпонентной абелевой модели Хиггса	140
Дьяченко А. Т., Митропольский И. А., Черняев А. П. Неравновесный квантовый гидродинамический подход и эмиссия фрагментов в столкновениях тяжелых ионов промежуточных энергий	141
Жаров М. А., Размыслов К. В., Монахов В. В., Валиев Ф. Ф. Моделирование кумулятивных эффектов в столкновениях тяжелых ионов при энергиях коллайдера NICA	142
Артеменков Д. А., Зайцев А. А., Зарубин П. И. Ядро ^8Be и состояние Хойла в диссоциации релятивистских ядер	143
Zubankov A. A. (on behalf of BM@N collaboration) Measurement of double differential inclusive cross sections of forward neutron emission in the BM@N experiment	144
Бердников Я. А., Иванищев Д. А., Котов Д. О., Малаев М. В., Рябов Ю. Г. Особенности измерения свойств резонансов в эксперименте MPD в Xe+W столкновениях при энергии 2,5 А*ГэВ	145

Идрисов Д. М., Губер Ф. Ф. Методы определения центральности с использованием передних детекторов в эксперименте BM@N	146
Лохтин И. П., Мягков Д. А., Петрушанко С. В., Снизгирев А. М. Моделирование влияния деформации ядер на азимутальную анизотропию частиц в генераторе событий HYDJET++	147
Nedorezov E. (STAR collaboration) Overview of the star hot QCD results	148
Plotnikov V. A. (for the BM@N collaboration) Ad correlation function in Xe+CsI collisions AT 3.8 AGeV in the BM@N experiment	149
Prokhorova D., Shi S., Andronov E. Heavy-flavor jet quenching in pre-equilibrium medium	150
Размыслов К. В., Жаров М. А., Валиев Ф. Ф., Монахов В. М. О применении генераторов EPOS4, UrQMD, RHQMD и PYTHIA для анализа событий в физике сверхвысоких энергий	151
Alizzi A. E., Silagadze Z. K. Pauli equation in spaces of constant curvature and extended Nikiforov-Uvarov method	152
Skorod'ko T. Yu. Dibaryon $d^*(2380)$: prediction, detection, understanding	153
Sharma S., Aparin A. Inclusive J/ψ production as a probe of gluon dynamics at NICA	154
Uzikov Yu. N., Temerbayev A. A., Tursunbayev N. T. The reactions $dd \rightarrow dd\pi\pi$ and $pd \rightarrow pd\pi\pi$ and dibaryon resonances	155
Феофилов Г. А., Зарицков А. А. Минимизация объемных флуктуаций при поиске критической точки сильно взаимодействующей материи в релятивистских ядерных столкновениях	156
Friesen A. V., Kalinovsky Yu. L., Tawfik A. N. Mass spectrum of noncharmed and charmed meson states at finite temperature in extended linear-sigma model	157

158

Секция 5. Физика малочастичных систем
Section 5. Few-body systems

Борзаков С. Б.

Возможное существование синглетного дейтрона как дибарионного резонанса и проблема существования динейтрона 159

Efimenko M. K., Kulikov V. A., Mazur A. I., Mazur I. A., Shin I. J., Shirokov A. M.

Excited states of ${}^6\text{He}$ nucleus in the SS-HORSE–NCSM approach 160

Зайцев А. С., Зайцева Д. С., Зайцев С. А.

Атом водорода в поле лазерного импульса в представлении параболических волновых пакетов 161

Зайцев С. А., Зайцева Д. С., Зайцев А. С., Анкарани Л. У., Попов Ю. В., Кузаков К. А.

Ионизация атомов протонным ударом в представлении параболических квазиштурмовских функций 162

Motovilov A. K., Vetrov S. S.

Resonances of a two-particle system on a 1D lattice 163

Rubtsova O. A., Ovsiannikov N. A.

Finding virtual states via wave-packet continuum discretization 164

Гуров Ю. Б., Евсеев С. А., Розов С. В., Телькушев М. В., Чернышев Б. А.

Поиск тринейтрона в реакциях поглощения остановившихся пионов ядрами ${}^9\text{Be}$ 165

Шалапинин Д. И., Колганова Е. А.

Исследование квантовой системы димера неона 166

Яковлев С. Л.

3-3 рассеяние в системах трёх частиц с короткодействующими и кулоновскими взаимодействиями 167

168

Секция 6. Ядерная астрофизика и физика нейтрино
Section 6. Nuclear astrophysics and neutrino physics

Gromov M. B. (on behalf of the JUNO collaboration)

Precise reactor antineutrino spectrum measurement with TAO detector 169

Дербин А. В., Драчнев И. С., Иванов Д. В., Муратова В. Н., Ниязова Н. В., Панкратов М. А., Семенов Д. А., Трушин М. В., Унжаков Е. В.

Поиск тяжелого стерильного нейтрино в бета-распаде ${}^{144}\text{Pr}$ 170

Kabir A. Analysis of radiative capture of proton ^{11}B (p, γ) ^{12}C at low energy	171
Кондратьев В. Н., Саймуха А. А. Эффекты динамо и осцилляций в спектрах нейтрино сверхновых	172
Кондратьев В. Н. Эффекты намагниченности ядер во взрывном нуклеосинтезе	173
Le H. (on behalf of nuGeN collaboration) Characterization of the cosmic muon background in the νGeN experiment	174
Lubashevskiy A. (on the behalf of the νGeN collaboration) Search for the rare processes within the νGeN experiment at Kalinin Nuclear Power Plant	175
Михеев С. А., Ланской Д. Е., Насакин А. И., Третьякова Т. Ю. Условия появления Λ -гиперонов в материи нейтронных звёзд в моделях среднего поля	176
Секция 7. Ядерная медицина, радиационная терапия и радиэкология Section 7. Nuclear medicine, radiation therapy and radioecology	177
Ашрапов У. Т., Хужаев С. С. Использование гамма-облученного оксида алюминия для изготовления генераторов технеция-99М	178
Балачков М. М., Сорокина А. А., Сухих Е. С., Селихова Е. А. Спектральные измерения пучка быстрых нейтронов циклотрона У-120	179
Васильева А. Г., Костин М. Ю., Пикалов В. А., Савицкая Е. Н., Суманев О. В., Янович А. А. Измерение сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$: особенности эксперимента и оценка неопределенностей	180
Запорожская К. В., Лыкова Е. Н., Кичигин Г. В., Щербаков А. А., Черняев А. П. Применение шумоподавляющих фильтров при плёночной дозиметрии радиохирургических планов лечения	181
Зябченков В. О., Мирзаев Н. А., Мохине Н. Д., Караиванов Д. В. Количественная оценка содержания тория и урана в свинце для радиационной защиты методом ИСП-МС	182
Киселев В. А., Черняев А. П., Удалов Ю. Д. Подход к оптимизации распределения поглощенной дозы в биологическом объекте в лучевой терапии пучком ускоренных протонов ...	183

Копылова Е. А., Горлачев Г. Е., Лыкова Е. Н., Суворов И. А., Черняев А. П. Применение деформируемой регистрации изображений в лучевой терапии ...	184
Кузьменков А. А., Желтоножская М. В., Пупышев В. Д., Черняев А. П. Фотоядерное получение медицинских изотопов рения на осмиевых и иридиевых мишенях	185
Мамаева С. Н., Павлов А. Н., Румянцева М. Н., Крылова Т. А., Максимов Г. В. Биофизическая модель электрических характеристик эритроцитов при лучевой терапии	186
Мерзликин Г. В., Адарова А. И., Сабуров В. О., Корякин С. Н. Корректировка и валидация алгоритма оценки пробега протонов в различных материалах на основании КТ-исследований	187
Мерзликин Г. В., Акулиничев С. В., Тагабилев Д. Г., Яковлев И. А. Реконструкция трёхмерного дозового распределения при облучении биологических объектов пучками протонов высокой интенсивности	188
Лыкова Е. Н., Оганян В. Р., Новикова Е. А., Черняев А. П. Методика дозиметрии источника для электронной поверхностной брахитерапии	189
Оганян В. Р., Горлачев Г. Е., Беляев В. Н. Биофизическое моделирование распределения температуры при гипертермии: обзор алгоритмов и проектирование расчётного модуля ...	190
Onischuk E. A., Kurachenko Yu. A., Chernyaev A. P., Rozanov V. V., Kim A. A. Optimization of photoneutron source parameters for boron neutron capture therapy	191
Парменова Е. В., Ющенко О. П. Реализация работы с данными КТ в системе планирования ионной лучевой терапии	192
Петров В. В., Жеребчевский В. И., Мальцев Н. А., Прокофьев Н. А., Землин Е. О., Скалецкий А. О. Трекинг, измерение энергии и получение диагностических изображений с использованием кремниевых пиксельных сенсоров	193
Петрова К. А., Мамаева С. Н., Кононов В. Н., Адышов Э. И. Накопление золошлаковых отходов, выбросов котельного комплекса и рост онкологической заболеваемости	194

Лыкова Е. Н., Пятаев Д. Н., Чжиян Чжоу, Назаренко А. В., Жаворонкова В. И., Черняев А. П.	
Исследование влияния термопластических масок на поверхностную дозу и дозовое распределение в лучевой терапии	195
Сабуров В. О., Соловьев А. Н., Казаков Е. И., Корякин С. Н., Иванов С. А., Каприн А. Д.	
Статус проекта по созданию комплекса нейтронной терапии на базе компактного нейтронного генератора НГ-24МТ	196
Соловьев А. Н., Кизилова Я. В., Шкрабо М. С., Бровин А. И., Иванов С. А.	
Особенности вычислительного прогнозирования отклика ионизационных камер для радиотерапевтического применения	197
Хуцистова А. О., Розанов В. В., Матвейчук И. В., Черняев А. П., Николаева Н. А.	
Моделирование комбинированного воздействия ионизирующего излучения и озона для стерилизации биоматериалов	198
Щербаков А. А., Зеленова С. А., Лыкова Е. Н., Черняев А. П.	
Оценка рисков развития радиационно-индуцированных заболеваний при проведении лучевой терапии	199
Юсупов М. Н., Линь Ч., Желтоножская М. В., Черняев А. П.	
Ядерные реакции на кислороде, углероде, азоте и боре при облучении протонным пучком 160 МэВ	200
Яковлев И. А., Акулиничев С. В., Гаврилов Ю. К., Джилкибаев Р. М.	
Расчет характеристик черенковского детектора для контроля пучков протонов, используемых для флэш-терапии	201
Стендовые доклады Poster section	202
Аламури А., Дзюба А. А., Добровольский А. В., Чубыкин А. Д.	
Моделирование и измерение параметров дрейфа электронов в активной мишени	203
Ashurko N. A., Bogdanov O. V., Wang Y.	
Channeling radiation as a tool for GDR excitation in Yttrium	204
Вуколова А.-Н. В., Пекшев А. Н., Семёнов С. В.	
Методы раннего обнаружения аномалий в радионуклидных выбросах АЭС на основе статистик многолетнего мониторинга	205
Гаганов В. В.	
Результаты измерения дифференциального сечения образования мгновенных гамма-квантов в реакциях быстрых нейтронов с ядрами титана ...	206

Долгополов А. В., Гаганов В. В., Кузнецов А. А. Результаты моделирования эксперимента по исследованию фотоядерных реакций на источнике комптоновского излучения	207
Дормидонов А. Е., Симонова В. А., Залозная Е. Д., Саввин А. Д. Детектор импульсного ионизирующего излучения с субнаносекундным временным разрешением на основе радиационно-наведенного поглощения света в лейкосапфире	208
Дербин А. В., Драчнев И. С., Иванов Д. В., Муратова В. Н., Панкратов М. А., Семенов Д. А., Трушин М. В., Унжаков Е. В. Поиск распадов с нарушением принципа Паули и барионного числа с помощью детектора Борексина	209
Дружинин Е. Д. Расчёт сечений образования изомера серебра ^{108m}Ag в (d,p) реакциях на ускорителе ЭГП-10	210
Дьяченко А. Т., Кург Т. К. Квазиклассическое описание поведения малого числа тел для адронов и темной материи	211
Ibraimova S. A., Lebedev I. A. Fluctuations and correlations in relativistic nucleus–nucleus collisions	212
Тимова Л. В., Дьячков В. В. Применение микроконтроллерных и микрокомпьютерных систем в измерительных комплексах на базе стандарта КАМАК	213
Efimov A. D., Koval I. V., Devaraja H. M., Izosimov I. N. Estimated $B(E2)$ values for neutron-rich actinide nuclei	214
Efimov A. D., Koval I. V., Devaraja H. M., Izosimov I. N. Binding energy estimates for even-even actinide nuclei	215
Efimov A. D., Koval I. V., Devaraja H. M., Izosimov I. N. Evolution of the neutron shell gap for $N \geq 150$ with increasing Z from 89 to 100	216
Жусупов М. А., Жаксыбекова К. А., Копенбаева А. С., Кабатаева Р. С. О природе низколежащих состояний ядра ^7Li	217
Жусупов М. А., Сахиев С. К., Кабатаева Р. С. О связи каналов в потенциальных кластерных моделях	218

Сидорова О. В., Зейналов Ш. С. Моделирование кросс-толка нейтронов в плотноупакованных сцинтилляционных сборках для экспериментов по множественности мгновенных нейтронов деления	219
Землин Е. О., Жеребчевский В. И., Мальцев Н. А., Кудояров М. Ф., Петров В. В. Диагностика пучков заряженных частиц и определение коэффициентов вторичной электронной эмиссии материалов	220
Зуев А. П. Изучение формата ENDF-6 для извлечения ядерных данных по реакциям с нейтронами	221
Каспаров А. А., Мордовской М. В., Афонин А. А., Мицук В. В., Мазур И. А. Исследование реакции $n + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p$ при энергии нейтронов 20 МэВ	222
Коваленко В. Н., Андронов Е. В., Жаров М. А. Моделирование подпорогового рождения антипротонов и кумулятивных процессов в столкновениях тяжелых ионов	223
Коваленко В. Н., Пучков А. М. Рождение странных частиц в pp- и AA-столкновениях в расширенной модели мультипомеронного обмена	224
Комарова Д. А., Жеребчевский В. И., Землин Е. О., Мальцев Н. А. Исследование сцинтилляционных детекторов, применяемых в диагностических системах время-пролётной позитронно-эмиссионной томографии	225
Кондратьев В. Н., Карпешин Ф. Ф. Безнейтринный двойной электронный захват, стимулируемый рентгеновскими лучами	226
Кострыгина А. М., Жеребчевский В. И., Алексеев И. Е., Амеркамов Д. А., Иванов Е. М., Мальцев Н. А., Петров В. В., Землин Е. О., Прокофьев Н. А., Торилов С. Ю. Особенности ядерных реакций с получением ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ на пучках протонов с энергиями до 100 МэВ	227
Зиновьев В. Г., Дэжуй Лю, Румянцева Д. А., Митропольский И. А. Стенд для проведения нейтронной активации	228
Magomedov G. Y., Mirzayev N. A., Baimukhanova A. E., Magomedbekov E. P., Filosofov D. V. Determination of the distribution coefficients of elements in the diacetyl/hydrochloric acid system for nuclear medicine applications	229

Мордовской М. В., Каспаров А. А., Афонин А. А., Драчев А. И., Мицук В. В., Лебедев В. М., Пономарев В. Н., Сахаров А. Н. Экспериментальная установка для определения спектра энергии возбуждения ядра ^{10}Be в реакции $n + ^9\text{Be}$	230
Мордовской М. В., Каспаров А. А., Сахаров А. Н. Измерение профиля пучка нейтронного поля центрального нейтронного канала на экспериментальных площадках установки РАДЭКС ИЯИ РАН ...	231
Дербин А. В., Драчев И. С., Иванов Д. В., Муратова В. Н., Панкратов М. А., Семенов Д. А., Трушин М. В., Унжаков Е. В. Поиск бустерной темной материи, ускоренной электронами космических лучей	232
Николаева Н. А., Розанов В. В., Мамаева С. Н., Матвейчук И. В., Черняев А. П., Хуцистова А. О. Анализ повреждения коллагена в костных биоимплантатах при радиационной стерилизации	233
Отводенко Я. О., Любашевский Д. Е., Титова Л. В., Юдаков А. Д., Габитов А. Р. Исследование деформаций предразрывных конфигураций фрагментов при эмиссии третьей легкой частицы	234
Алексеев И. Е., Дербин А. В., Драчев И. С., Иванов Д. В., Муратова В. Н., Панкратов М. А., Семенов Д. А., Трушин М. В., Унжаков Е. В. Измерения бета-спектра ^{99}Tc с помощью спектрометра на основе $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов	235
Васильева А. Г., Дурум А. А., Костин М. Ю., Маишеев В. А., Парменова Е. В., Полуэктов И. В., Решетников С. Ф., Савин Д. А., Сандомирский Ю. Е., Чесноков Ю. А., Янович А. А. Применение на ускорительном комплексе У-70 «карандашного пучка», выводимого изогнутым кристаллом	236
Пекшеев А. Н., Вукколова А.-Н. В., Семёнов С. В. Анализ больших массивов радиоэкологических измерений после крупных ядерных аварий: оценка эффективных периодов полувыведения и пространственных закономерностей на открытых данных	237
Петровская А. С., Цыганов А. Б. Перспективы применения сухой ионно-плазменной технологии дезактивации оборудования ЯЭУ из титановых сплавов	238

Вахтель В. М., Дьячков В. В., Калинин С. Д., Писклюков А. А., Кострюков П. В. Цифровая модель процесса неразрушающего контроля положения пружины в ТВЭЛе гамма-абсорбционным методом	239
Вахтель В. М., Дьячков В. В., Калинин С. Д., Писклюков А. А., Кострюков П. В. Анализ влияния локальных неоднородностей топливной таблетки на прохождение гамма-излучения через ТВЭЛ	240
Вахтель В. М., Калинин С. Д., Писклюков А. А., Кострюков П. В. Математическое моделирование методов определения Флюенса альфа-излучения источника, расположенного на сложной поверхности	241
Сидорова О. В., Зейналов Ш. С. Моделирование кросс-толка нейтронов в плотноупакованных сцинтилляционных сборках для экспериментов по множественности мгновенных нейтронов деления	242
Симонова В. А., Саввин А. Д., Митрохин В. П., Дормидонов А. Е. Фемтосекундная лазерная система для исследования отклика сцинтилляторов γ -излучения	243
Сорокина А. А., Селихова Е. А., Сухих Е. С., Балачков М. М. Математическое моделирование при исследовании материала для коллиматора смешанного гамма-нейтронного пучка циклотрона У-120	244
Толстых Ю. В., Валиев Ф. Ф., Вечернин В. В., Иголкин С. Н., Калинин Н. И., Макаров Н. А., Феофилов Г. А. Подготовка малошумящего детектора на микроканальных пластинах для регистрации кумулятивных частиц в экспериментах на фиксированной мишени	245
Торилов С. Ю., Жеребчевский В. И., Мальцев Н. А. Реакции слияния тяжелых ядер для астрофизических задач	246
Ульянова В. С., Байрамов Д. Ф., Сидоров С. В., Степанов М. Е., Стопани К. А., Третьякова Т. Ю. Характеристики α -распада неизвестных ядер в области $Z \geq 100$	247
Хайруллин А. Р., Сидоров С. В., Третьякова Т. Ю. Влияние тензорных сил на нейтронную шубу в изотопах олова	248
Shabanov A., Bocharnikov V., Golubeva M., Guber F., Karpushkin N., Morozov S., Parfenov P., Pshenichnov I., Zubankov A. Study of the correlation function between cells in the HGND at the BM@N experiment	249

Научное электронное издание

«ЯДРО – 2026»

**Физика атомного ядра
и элементарных частиц.
Ядерно-физические технологии**

Тезисы докладов LXXVI Международной конференции

(21–26 сентября 2026 г.)

Публикуется в авторском варианте

Ответственный за выпуск *А. И. Мазур*

Дизайнер обложки *К. А. Драчёв*

Подписано к использованию 27.07.2026. Объем данных: 6,08 МБ.

Издательство Тихоокеанского государственного университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел электронных и печатных изданий РИОЦ ТОГУ.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.
