



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**



**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦИНА**

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Отчет за 2022 год

*Москва
2023*

УДК 539.165:537,591
БИК 22.38

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Отчет за 2022 год

Под редакцией член-корр. РАН Э.Э. Бооса, Е.А. Сигаевой

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.

Отчет за 2022 год /Под редакцией член-корр.РАН Э.Э. Бооса, Е.А. Сигаевой; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. — М., 2023.

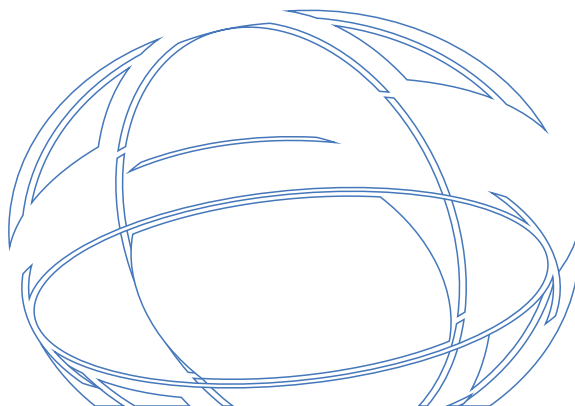
В сборнике содержится краткое описание полученных в НИИЯФ МГУ в 2022 г. результатов исследований в области физики высоких энергий и ядерной физики, составленное отделом научной информации на основе данных, предоставляемых информационно-аналитической системой «Наука — МГУ» и опубликованных в отечественной и зарубежной литературе.

**К 270-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**



СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В НИИЯФ МГУ. КРАТКАЯ СПРАВКА	5
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В НИИЯФ МГУ В 2022 г. В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.....	7
Физика высоких энергий	7
Ядерная физика	13
СОБЫТИЯ 2022 г.....	32
51-я Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 24–26 мая 2022г.....	32
LXXII Международная конференция "Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения", 11–16 июля 2022 г.....	32
XXIII межвузовская молодежная научная школа -конференция имени Б.С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", 23–24 ноября 2022 г.....	33
Семинар-совещание «Комптоновские источники рентгеновского излучения, перспективы развития и применения», 7–8 июня 2022 г.....	34



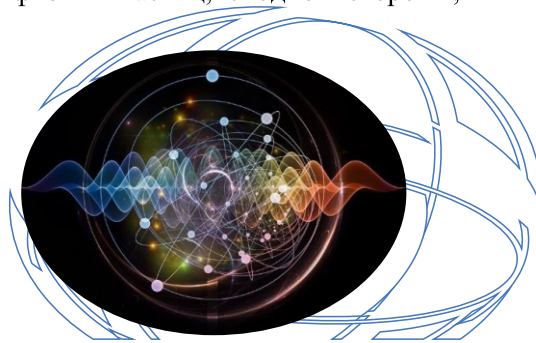
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В НИИЯФ МГУ. КРАТКАЯ СПРАВКА

Физика высоких энергий, одно из наиболее быстро развивающихся во всем мире направлений исследований в области физики, занимает важное место среди научных направлений НИИЯФ МГУ. Цель этих исследований – получение сведений о самых фундаментальных свойствах материи на расстояниях порядка 10^{-16} – 10^{-17} см и меньше. Перед физикой высоких энергий стоит целый ряд нерешенных проблем. Стандартная модель физики частиц, с одной стороны, весьма успешно (в ряде случаев на уровне точности 0,1%) описывает существующие экспериментальные данные, однако, с другой стороны, имеет ряд внутренних проблем, например, отсутствие объяснения иерархии масштабов.

Исследования по физике атомного ядра и ядерных реакций под действием заряженных частиц низких энергий были начаты в НИИЯФ МГУ в конце сороковых годов двадцатого века. В институте существует целый ряд ускорителей для проведения экспериментальных работ по этому направлению. Экспериментальные результаты, получаемые на этих и других установках НИИЯФ МГУ, способствуют развитию теоретических исследований по ядерной физике в институте.

Тематический план научно-исследовательских работ НИИЯФ МГУ включает в себя 11 тем исследований в области физики высоких энергий и ядерной физики:

- «Теоретические исследования фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и развитие прикладных методов теории поля»;
- «Экспериментальные исследования по физике тяжелых кварков, электрослабых и нестандартных взаимодействий при высоких энергиях»;
- «Исследование структуры и эволюции адронов в экстремальных состояниях при высоких энергиях»;
- «Изучение рождения и характеристик тяжелых частиц и резонансов в коллайдерных экспериментах»;
- «Изучение редких распадов B -мезонов, процессов рождения и распада прелестных барионов на коллайдерах»;
- «Разработка программно-аппаратных средств для экспериментов в физике высоких энергий»;
- «Фундаментальные и прикладные проблемы физики ядерных реакций»;
- «Теория систем нескольких тел и взаимодействие ядер с электронным окружением»;
- «Взаимодействие составных частиц и методы симметрии в ядерной и субъядерной физике»;
- «Электромагнитные взаимодействия»;
- «Радиационные технологии. Медицинская физика».



НИИЯФ МГУ активно участвует в деятельности междисциплинарной Научно-образовательной школы МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» и реализует её следующие проекты:

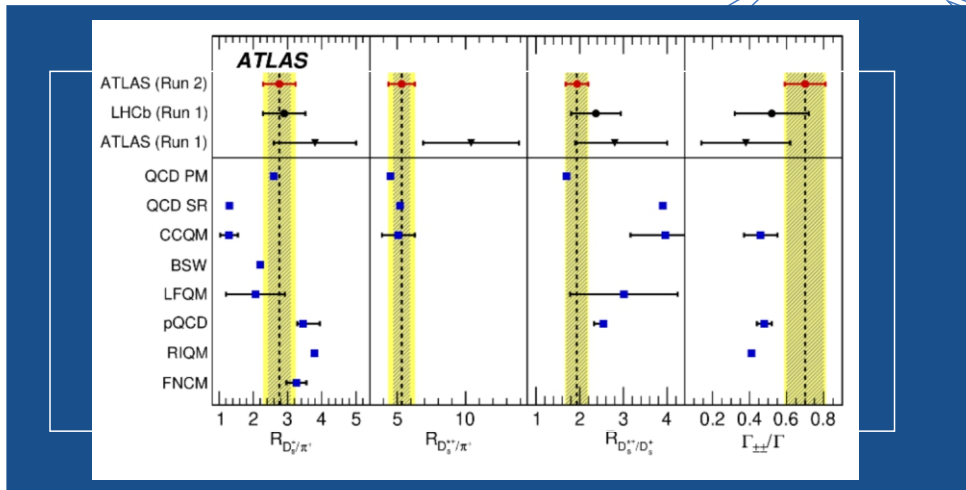
- «Радиационная медицина», направленный на повышение точности проведения диагностических и терапевтических процедур в лучевой терапии;
 - «Радиационная обработка», его задача – исследовать воздействие ионизирующего излучения на микробиологические и химические показатели биологических тканей;
 - «Фотоядерные реакции», направленный на изучение фотоядерных реакций с испусканием альфа-частиц на цирконии, ниобии и молибдене, и возможности получения медицинского изотопа Zr-89 с использованием ускорителей электронов с энергией пучка 20 МэВ;
 - «Исследование активации легких элементов в крови человека» с целью исследования активации химических макроэлементов в крови человека при проведении лучевой терапии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В НИИЯФ МГУ В 2022 г. В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Физика высоких энергий

Изучение распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ с помощью детектора АТЛАС

Измерены характеристики распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ с использованием данных о pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, собранных детектором АТЛАС на Большом адронном коллайдере в 2015 – 2018 гг. и соответствующих 139 fb^{-1} интегральной светимости. Были измерены отношения парциальных ширин этих распадов по отношению к парциальной ширине распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$. Точность полученных результатов превосходит точность всех предыдущих измерений. Проведено сравнение с теоретическими предсказаниями, предыдущими измерениями и измерениями аналогичных отношений для распадов лёгких B -мезонов.

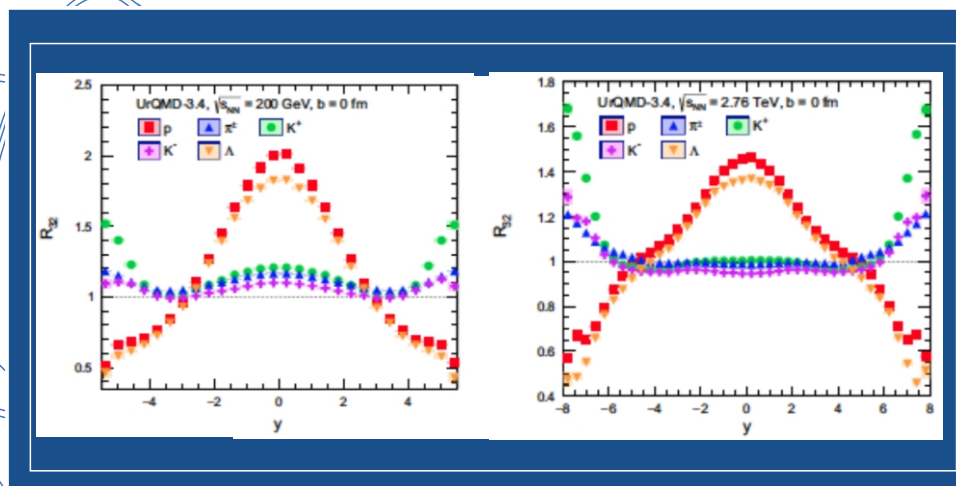


Сравнение измеренных парциальных ширин $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ распадов по отношению к парциальной ширине распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ ($R_{D_s^+/\pi^+}$ and $R_{D_s^{*+}/\pi^+}$), отношения парциальных ширин распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ ($R_{D_s^{*+}/D_s^+}$) и относительной доли поперечной поляризации в распаде $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ ($\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$) с предыдущими измерениями и теоретическими предсказаниями

Тройные столкновения ядер и адронов высоких энергий – новый метод изучения фазовой диаграммы КХД при высоких барионных плотностях

Предложен совершенно новый метод исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующего вещества путем рассеяния двух встречных пучков

на неподвижной мишени. Представлены результаты моделирования центральных тройных ядерных столкновений с помощью модели UrQMD 3.4 для энергий столкновения центра масс пучка $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Основным результатом является то, что даже при таких очень высоких энергиях столкновения начальные плотности барионного заряда примерно в 3 раза выше, чем в обычных двойных ядерных столкновениях. В результате, например, выходы протонов и Λ -гиперонов сильно усиливаются при тройных ядерных столкновениях. Среди перспективных приложений метода рассмотрены низкоэнергетические столкновения трех ядер свинца, проходящих через промежуточную систему с электрическим зарядом 246 ед., что существенно превышает критическое значение 173 и, следовательно, может иметь решающее значение для изучения спонтанного излучения позитрон-электронных пар из вакуума. Приведены убедительные аргументы в пользу того, что метод тройных ядерных столкновений позволит вывести исследования фазовой диаграммы КХД на совершенно новый уровень.



Быстротные распределения отношений множественностей адронов в столкновениях трех ядер свинца к их множественностям в стандартных бинарных соударениях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ (левая панель) и $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ (правая панель)

Исследование возможности регистрации фазового перехода во взаимодействиях тяжелых ионов при энергиях 7.7–11.5 ГэВ методом факториальных моментов

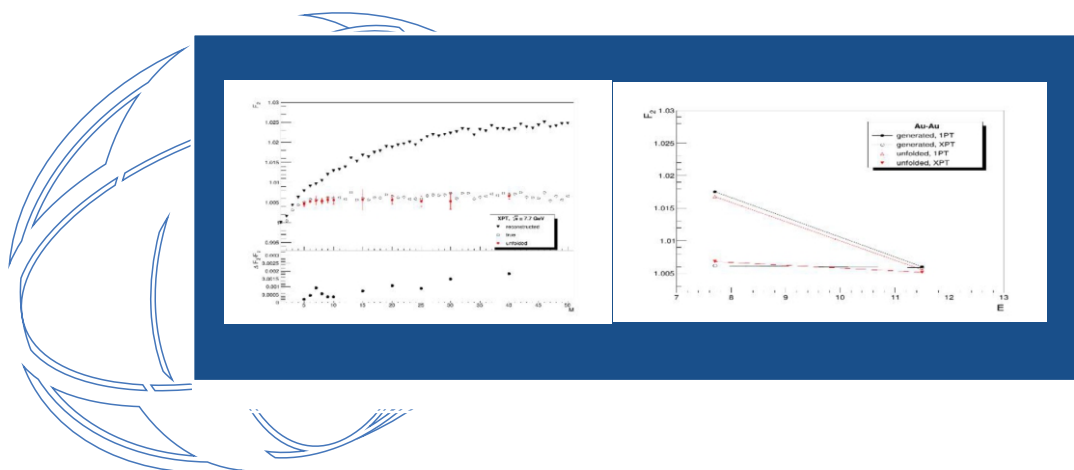
Изучение нормированных факториальных моментов распределений множественности в интервалах по быстройте в зависимости от размера интервала проведено путём анализа столкновений «золото – золото» для энергий $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ и 11.5 ГэВ с использованием Монте-Карло генератора vHLL+UrQMD. Данные измерения чувствительны к размеру и силе многочастичных корреляций. События были проведены через модель установки MPD и реконструированы.

Анализ событий с высокой множественностью частиц, полученных с помощью модели UrQMD+vHLL при энергиях 7.7 ГэВ и 11.5 ГэВ, показал энергетическую зависимость поведения факториальных моментов распределения по множественности второго порядка для фазового перехода первого рода. Такая

зависимость для фазового перехода типа кроссовер при этом не наблюдалась. Подобное поведение факториальных моментов было обнаружено и при переходе на детекторный уровень – к реконструированным с учетом параметров детектора событиям. При этом на вид зависимости $F_2(M)$, построенной для интервалов по быстрой частиц, значительно и непредсказуемым образом может влиять способ идентификации частиц. Использование псевдобыстроты как новой динамической переменной при построении факториальных моментов более эффективно, т.к. в данном случае распределение частиц по интервалу переменной не зависит от способа идентификации.

Так как значения эффективности и чистоты реконструкции, а также другие детекторные эффекты могут влиять на конечный вид распределений, искажая их, была проведена процедура восстановления истинных значений из измеренных (реконструированных). Использование пакета ROOUNFOLD с алгоритмом SVD для регуляризации оказалось эффективным для восстановления истинных значений факториальных моментов. Также была рассчитана статистическая ошибка метода.

Полученные результаты можно будет использовать при анализе реальных данных в эксперименте MPD на коллайдере NICA. Анализируя в дальнейшем экспериментальную зависимость поведения факториальных моментов от энергии, можно будет сделать выводы о типе кварк-адронного фазового перехода и применимости теоретических моделей.

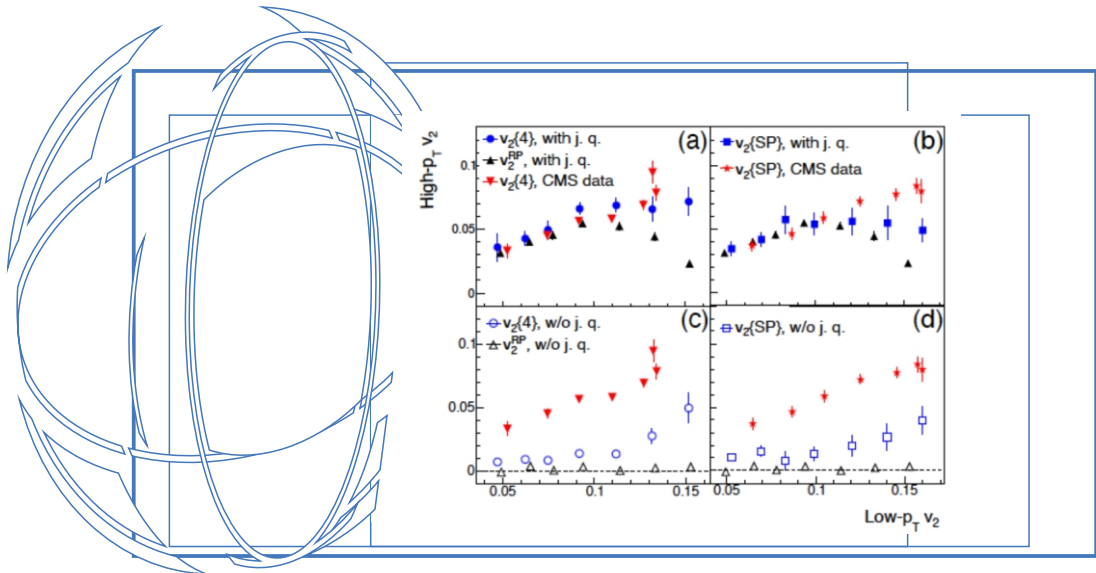


Слева: Зависимость факториальных моментов от числа интервалов разбиения по псевдобыстроте $[-1, 1]$, $F_2(M)$, для реконструированных, истинных и восстановленных значений моментов. Справа: Зависимость высоты плато $F_2(M)$ от энергии взаимодействия для фазового перехода 1-го рода и кроссовера для истинных и восстановленных функций $F_2(M)$

Природа азимутальной анизотропии частиц при малых и больших поперечных импульсах в ультррелятивистских $A+A$ -столкновениях

Данные ЛНС по корреляциям эллиптического потока v_2 частиц при малых и больших поперечных импульсах p_T в столкновениях $Pb + Pb$ при энергии центра масс на пару нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ анализировались в рамках модели HYDJET++. Эта модель включает в себя мягкую и жесткую составляющие, что позволяет описать область как малых, так и больших поперечных импульсов. Возникновение эллиптического потока и его амплитуда в разных областях по p_T

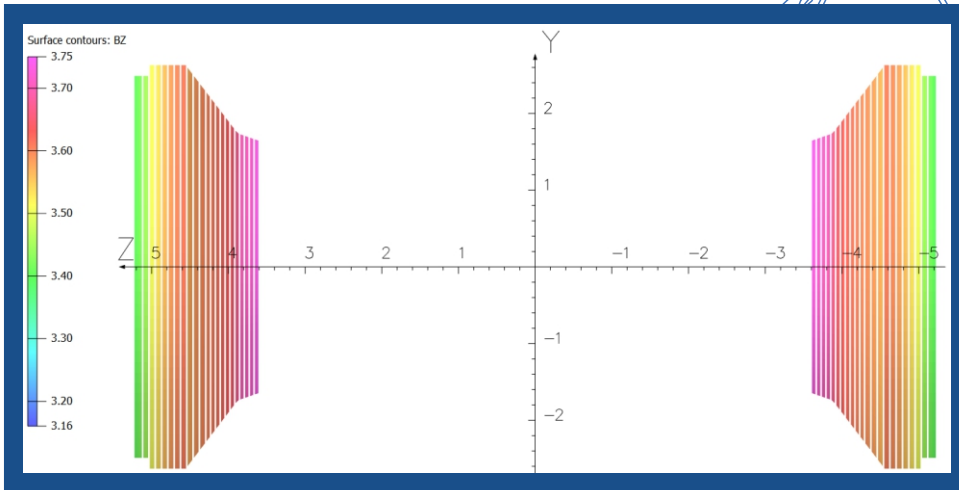
исследовались для столкновений Pb + Pb с различной центральностью. Показано, что экспериментально наблюдаемые корреляции между v_2 при низких и высоких p_T в периферийных столкновениях свинец-свинец обусловлены корреляцией частиц в струях.



Зависимость от центральности корреляций между эллиптическими потоками адронов с малым и большим поперечным импульсом в столкновениях Pb + Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ. Предсказания модели HYDJET++ выполнены как с учетом эффекта гашения струй (jet quenching) (a), (b), так и без учета этого эффекта (c), (d). Данные коллаборации CMS показаны красными символами

Расчет аксиальных электромагнитных сил, действующих на пластины торцевых поглотителей частиц высокогранулярного адронного калориметра, размещенного внутри сверхпроводящего соленоида установки CMS

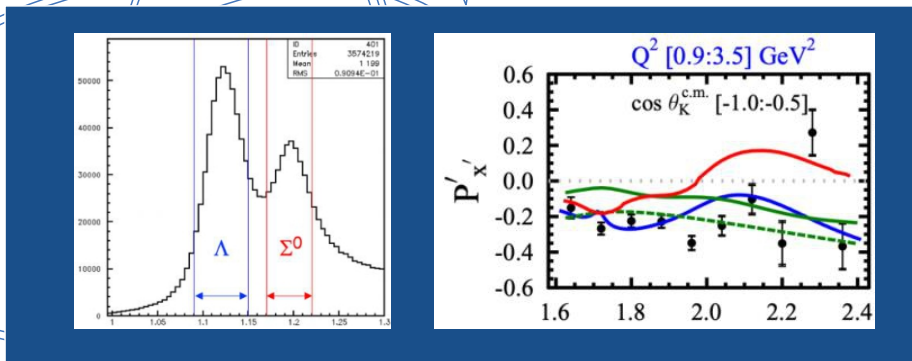
Выполнена модернизация модели магнита установки CMS с включением внутрь сверхпроводящего соленоида двух торцевых поглотителей нового высокогранулярного адронного калориметра HGCal, состоящих из 22 пластин из нержавеющей стали каждый. Объем пластин в каждом поглотителе частиц составляет около 21 м³. При рабочем значении плотности магнитного потока 3,8 Тл внутри соленоида аксиальные электромагнитные силы, действующие на пластины, зависят от магнитной проницаемости нержавеющей стали, выбранной для изготовления пластин. Вычисления, выполненные с использованием модернизированной модели магнита установки CMS, ограничили допустимую величину относительной магнитной проницаемости значением 1,05, при котором аксиальная сила на каждый поглотитель частиц не превышает 1,58 МН. При значении относительной магнитной проницаемости 1,01 сила, действующая на каждый поглотитель в направлении центра соленоида, уменьшается в 5 раз, при значении 1,005 – в 10 раз. Конструкторскому персоналу установки CMS выданы подробные рекомендации по выбору материала для пластин поглотителей частиц.



Распределение аксиальной плотности магнитного потока на поверхности пластин из нержавеющей стали высокогранулярного адронного калориметра HGCal. Цветовая шкала дана в Тл

Первые данные детектора CLAS12 по поляризации L- и S-гиперонов в реакциях электроорождения K^+L и K^+S^0 конечных состояний на протонах

Получены первые результаты экспериментов по исследованию структуры и спектра нуклонных резонансов (N^*) на детекторе CLAS12. Из данных реакций электроорождения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ определены поляризации конечных гиперонов в области инвариантных масс конечных адронов W , отвечающей полному перекрытию резонансной области. Впервые получены детальные результаты по зависимостям поляризации гиперонов от W при $1.6 < W < 2.4$ ГэВ, где могут быть обнаружены гибридные барионы, состоящие из 3 одетых кварков и глюона. Будущий совместный анализ дифференциальных сечений и поляризационных наблюдаемых позволит извлечь амплитуды электровозбуждения большинства N^* . Детектор CLAS12 является единственной в мире установкой, позволяющей исследовать эволюцию амплитуд электровозбуждения N^* в области квадратов 4-импульсов виртуальных фотонов до $8-10$ ГэВ². Анализ этих результатов в рамках решений уравнений движения полей кварков и глюонов, определяемых Лагранжианом КХД в методе уравнений Дайсона-Швингера, открывает перспективу доступа к механизмам формирования доминирующей части массы адронов и структуры N^* при переходе от непертурбативного к пертурбативному режимам сильного взаимодействия. Результат получен в составе коллаборации CLAS.



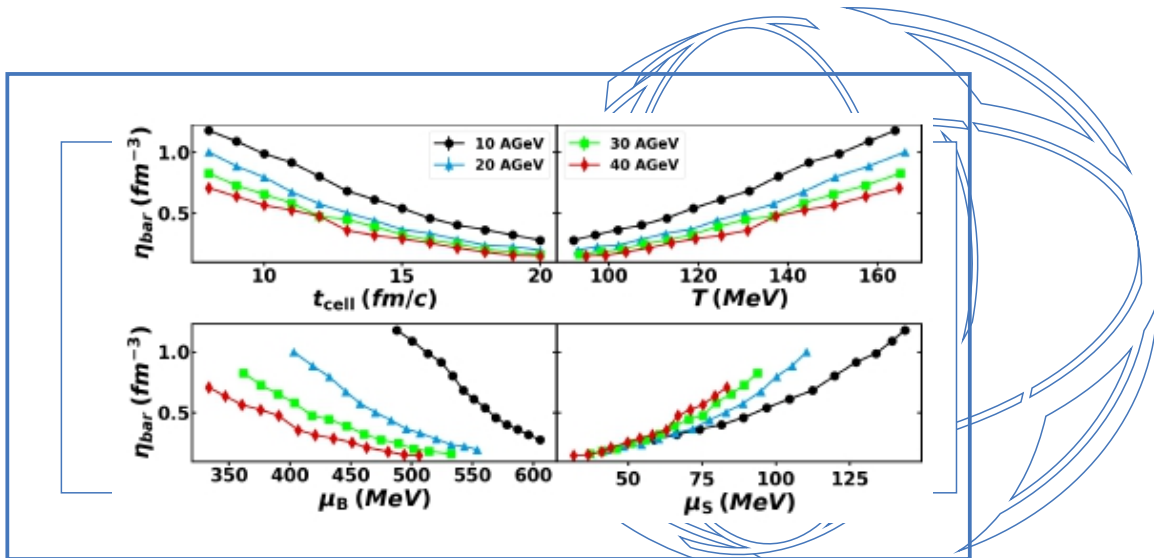
Слева: Спектр недостающих масс системы $e'K^+X$ (в ГэВ), измеренный в CLAS 12.

Справа: P'_x компонента поляризации Λ -гиперона как функция инвариантной массы конечных адронов W (ГэВ), при виртуальности фотона $0.9 < Q^2 < 3.5 \text{ ГэВ}^2$ и значении косинуса угла эмиссии каона в системе центра масс фотон-протон $[-1.0; -0.5]$.

Зеленая сплошная линия – модель RPR-2011, зеленая штриховая линия – модель RPR-2011 без резонансного вклада, красная линия – модель BS3, голубая линия – модель Каон-MAID

Полная и частичная сдвиговая вязкость в столкновениях тяжелых ионов при энергиях BES, FAIR и NICA

Сдвиговая вязкость рассчитывалась для горячей и плотной ядерной материи, образующейся в центральных столкновениях ионов золота при энергиях BES RHIC, FAIR и NICA. Для генерации соударений использовалась транспортная модель UrQMD. Сдвиговая вязкость была получена в рамках формализма Грина–Кубо. Модель адронно-резонансного газа HRG использовалась для определения температуры и химических потенциалов барионного заряда и странности на основании плотности энергии, плотности барионного заряда и плотности странности, полученных из расчетов микроскопической модели. В отличие от предыдущих работ теперь частичная вязкость определялась для основных видов адронов, таких как нуклоны, пионы, каоны и Λ -гипероны, через корреляторы нуклон-нуклонного, пион-пионного и т.д. взаимодействий. Было найдено, что уменьшение энергии налетающего пучка E_{lab} с 40 А·ГэВ до 10 А·ГэВ приводит к увеличению сдвиговой вязкости барионов, сопровождаемому уменьшением сдвиговой вязкости мезонов. Показано, что отношение полной сдвиговой вязкости к плотности энтропии также уменьшается.



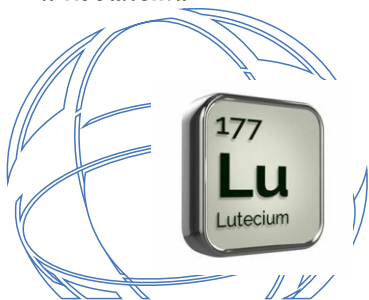
Временная эволюция сдвиговой вязкости барионов в центральной области Au + Au столкновений при энергиях от 10 А·ГэВ до 40 А·ГэВ и зависимость барионной вязкости от температуры, барионного химического потенциала и химического потенциала странности

Модели $F(R)$ гравитации, обобщающие модель Старобинского

Изучены различные однопараметрические расширения модели Старобинского, которые, как и сама модель Старобинского, удовлетворяют всем современным ограничениям на инфляционные параметры. Исследованы два варианта обобщения модели Старобинского: построение однопараметрических семейств моделей $F(R)$ гравитации, включающих модель Старобинского, и добавление поправок, связанных с теорией суперструн. Изучена модификация $R+R^2$ гравитации с суперструнной поправкой, которая может быть рассмотрена в качестве ведущей квантовой поправки и представима в четырех измерениях, как квадрат тензора Бела-Робинсона, помноженный на положительный параметр β . Найдена физически допустимая область значений параметра β . Для модификации модели Старобинского в действие добавлялись члены, пропорциональные R^4 , R^3 или $R^{3/2}$, и вычислялись соответствующие скалярные потенциалы и инфляционные параметры. Также была изучена модель с добавлением члена $(R+R_0)^{3/2}$. Получено, что добавление члена "пропорционального $R^{3/2}$ или $(R+R_0)^{3/2}$ " позволяет увеличить значение инфляционного параметра r , определяющего отношение квадратов амплитуд тензорных и скалярных пертурбаций, в четыре раза по сравнению со значением этого параметра в модели Старобинского. В настоящее время известна только верхняя граница значений параметра r , которая выше максимального полученного значения примерно в два раза.

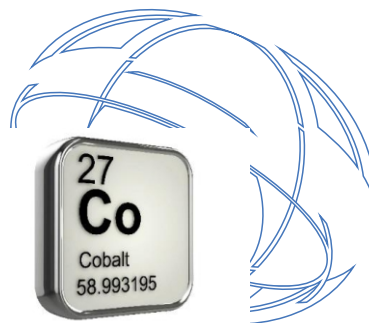
Ядерная физика

Метод быстрого получения медицинских радиоактивных изотопов лютеция и кобальта

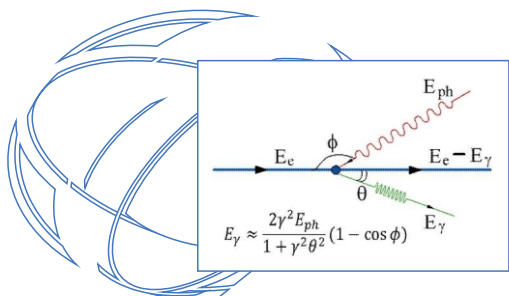


Лютеций-177 (Lu-177) относится к числу наиболее перспективных радионуклидов, служащих основой для производства инновационных радиофармацевтических препаратов. По оценкам специалистов, препараты с Lu-177 демонстрируют высокую эффективность в адресной терапии ряда онкологических заболеваний, среди них метастатические формы кастрационно-резистентного рака предстательной железы, нейроэндокринные опухоли, рак легких и другие. Лютеций-177 получают при облучении мишеней в реакторе или на циклотроне, однако растущий мировой спрос на этот изотоп заставляет искать новые пути его получения. Химики ГЕОХИ вместе с физиками НИИЯФ МГУ разработали и апробировали новый способ получения лютеция-177 фотоядерным методом, включающим облучение мишени из оксида гафния так называемыми тормозными фотонами, возникающими при работе ускорителя электронов. Работа выполнена исследователями Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН совместно с НИИЯФ МГУ.

Также ученые ГЕОХИ РАН и НИИЯФ МГУ предложили и апробировали простой и быстрый способ получения радиоактивных изотопов кобальта для целей ядерной медицины. Следующие шаги химиков ГЕОХИ РАН и физиков ускорительного комплекса НИИЯФ МГУ будут направлены на поиски носителей для изотопов кобальта среди различных материалов. (По материалам РИА Новости и Минобрнауки РФ).



Разработка комptonовского источника с энергией рентгеновских фотонов до 180 кэВ для исследований в области биологии, медицины, материаловедения, быстротекающих процессов, ядерной физики



Кинематическая схема процесса комptonовского рассеяния лазерного фотона на электроны

Источники рентгеновского и гамма-излучения на основе обратного комptonовского рассеяния лазерных пучков на релятивистских электронных пучках (комptonовские источники (КИ)) являются новым типом лабораторных спектрально ярких источников фотонов с энергией от десятков кэВ до десятков МэВ, активные разработки которых в последние два десятилетия ведутся во многих научных центрах мира.

В 2022 г. создана основа для разработки и создания КИ рентгеновского излучения на базе линейного ускорителя на энергию 50 МэВ и для разработки методик ядерно-физических экспериментов на

пучке монохроматического гамма-излучения с перестраиваемой энергией. Сформулированы требования к составу необходимых систем и узлов и характеристикам КИ. Следующим шагом является разработка проекта и создание комптоновского источника монохроматического рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией.

Требования к характеристикам комптоновского источника рентгеновского излучения

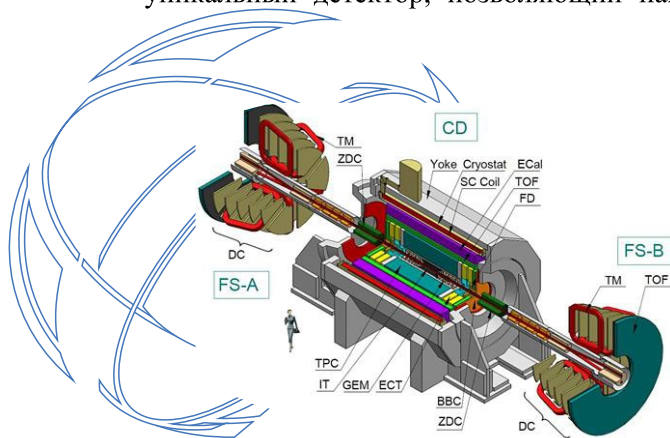
Диаметр источника	30 ± 10 мкм
Длительность импульса	10 ± 5 пс
Максимальная частота следования импульсов	1000 Гц
Угол столкновения электронного и лазерного пучков	$3^0 \pm 2^0$
Угловая расходимость, полный угол при максимальной энергии	$2,0 \pm 0,8$ мрад

Разработка внутренней трековой системы (ITS) эксперимента MPD

В начале марта завершилась разработка внутренней трековой системы (ITS) эксперимента MPD на строящемся в рамках мегапроекта коллайдере NICA, а 23 марта была опубликована для обсуждения первая версия "Технических предложений" (Technical Design Report – TDR) ITS. Группа НИИЯФ МГУ активно участвует в разработке внутренней трековой системы. ITS MPD будет установлен в эксперимент, когда будут достигнуты планируемые параметры пучков коллайдера. Трековая система представляет собой уникальный детектор, позволяющий находить треки частиц с точностями в

единицы микрон.

Таким образом завершилась стадия подготовки и начинается стадия непосредственного создания уникальной трековой системы на базе кремниевых пиксельных сенсоров с внутренним усилением (MAPS). Напомним, что в рамках научной программы по изучению горячей и плотной барионной материи в ОИЯИ (Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна) реализуется проект по



созданию нового ускорительного комплекса со встречными пучками NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Новый ускорительный комплекс позволит исследовать взаимодействия тяжелых ионов в широком диапазоне атомных масс: от легких ядер до ядер золота при энергии 3–11 ГэВ/нуклон в системе центра масс и светимости $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при частоте 6 кГц.

Железнодорожный инспекционно-досмотровый комплекс на базе ускорителя, разработанного в ЛЭУ МГУ

В Забайкальске открылся первый в России стационарный инспекционно-досмотровый комплекс в пункте пропуска через государственную границу с Китаем. Инспекционно-досмотровый комплекс (ИДК) разработан и установлен холдингом «Росэлектроника» Госкорпорации Ростех и представляет собой полностью отечественную разработку компании «Скантроник Системс», НПП «Торий» (входят в холдинг «Росэлектроника») и специалистов лаборатории электронных ускорителей МГУ. ИДК предназначен для таможенного, пограничного и иных видов контроля грузов без вскрытия контейнеров и остановки состава на скорости до 70 км/ч. От зарубежных аналогов комплекс выгодно отличается тем, что распознает четыре группы материалов (органика, неорганика, тяжелые и лёгкие металлы) вне зависимости от плотности, укладки и свойств материалов, а также способен дистанционно оценить вес товарной партии или ее части с погрешностью не более 10%. Основой комплекса является ускоритель электронов, разработанный и изготовленный лабораторией электронных ускорителей МГУ, созданной на базе отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ. В настоящее время аналогичные инспекционно-досмотровые комплексы работают на Крымском мосту, еще несколько строится на пунктах пропуска на границе с Китаем.



Калибровочная система для детектора реакторных антинейтрино ТАО в рамках проекта JUNO

В НИИЯФ МГУ ведётся разработка уникальной светодиодной калибровочной системы, которая позволит контролировать стабильность функционирования детектора реакторных антинейтрино ТАО в рамках проекта JUNO. Светодиодная калибровочная система основана на удалённо управляемом генераторе коротких (~10–20 нс) двойных световых импульсов. Передача световых импульсов от электроники, расположенной вне пассивной защиты, в детектор осуществляется по оптическому волокну, к концу которого прикреплен диффузор для улучшения изотропности вторичного излучения в сцинтилляторе. В 2022 г. завершена разработка, изготовление и локальное тестирование блока управления системой ввода диффузора в детектор. Модель источника добавлена в официальный программный пакет для моделирования Монте-Карло. Вся система прошла комплексное тестирование, в том числе при температуре функционирования детектора ТАО-50. По итогам тестирования в калибровочную систему внесены небольшие изменения. Оборудование подготовлено для отправки в Пекин, где будет тестироваться уже в составе прототипа центральной части детектора ТАО.



Блок управления системой ввода диффузора (источника света) в детектор ТАО

Демонстрационный эксперимент на Калининской АЭС по мониторингу работы ядерного реактора нейтринным методом

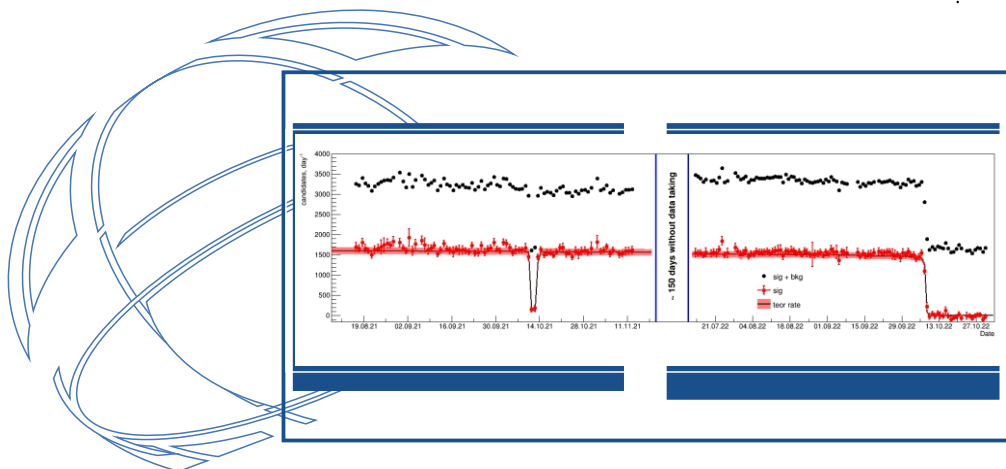
Регистрируя реакторные антинейтрино, можно независимо контролировать работу ядерных реакторов и следить за нераспространением делящихся материалов. Созданная при участии сотрудников НИИЯФ МГУ установка iDREAM призвана продемонстрировать возможность такого контроля дешёвым и весьма простым в изготовлении нейтринным детектором. Установка iDREAM является жидким сцинтилляционным детектором нейтрино с небольшой мишенью, объём которой составляет ~1 м³. Все части установки адаптированы к размещению на АЭС.



Детектор iDREAM на Калининской АЭС в подреакторном помещении третьего энергоблока

В 2022 г. выполнены измерения в двух режимах: с включённым и выключенным реактором, ведётся активная обработка данных. Наличие или отсутствие антинейтринного излучения регистрируется достоверно, показана

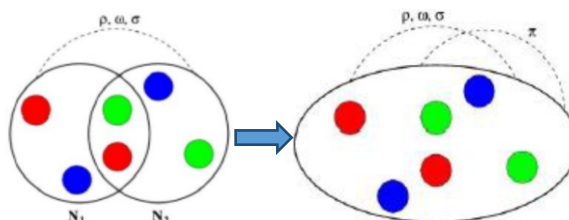
взаимосвязь изменения потока антинейтрино при изменении режима работы реактора. Изучается возможность использования детектора в качестве нейтринного спектрометра. Работы выполнены в составе коллаборации iDREAM



Скорости счёта антинейтринных и фоновых событий в детекторе iDREAM, размещённом у третьего энергоблока на Калининской АЭС. Резкие изменения соответствуют остановке или возобновлению работы реактора

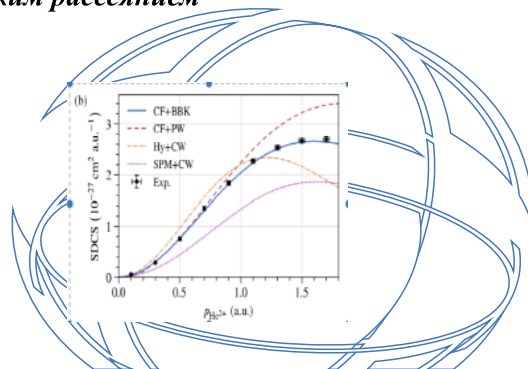
Дибарионные резонансы и короткодействующее NN-взаимодействие

Разработана дибарионная концепция ядерной силы, предполагающая, что притяжение между нуклонами на средних расстояниях в основном связано с образованием промежуточного шестикваркового (дибарионного) состояния. Для построения соответствующей модели NN-взаимодействия используется микроскопическое шестикварковое описание NN-системы, в котором особую роль играют аспекты симметрии. Показано, что NN-взаимодействие во всех важных парциальных волнах может быть описано суперпозицией дальнедействующего t-канального однопионного обмена и s-канального обмена промежуточным дибарионом. Модель хорошо описывает как упругие фазовые сдвиги, так и неупругие явления при NN-рассеянии во всех парциальных волнах S, P, D и F при энергиях от нуля до 600–800 МэВ и даже выше. Установлено, что параметры промежуточных шестикварковых состояний, соответствующие наилучшему совпадению данных NN-рассеяния, согласуются с параметрами известных дибарионных резонансов в тех NN-частичных конфигурациях, существование которых подтверждено экспериментально. Также даны предсказания для новых дибарионных состояний.



Импульсные распределения ионов и электронов при одинарной и двойной ионизации гелия, индуцированной комптоновским рассеянием

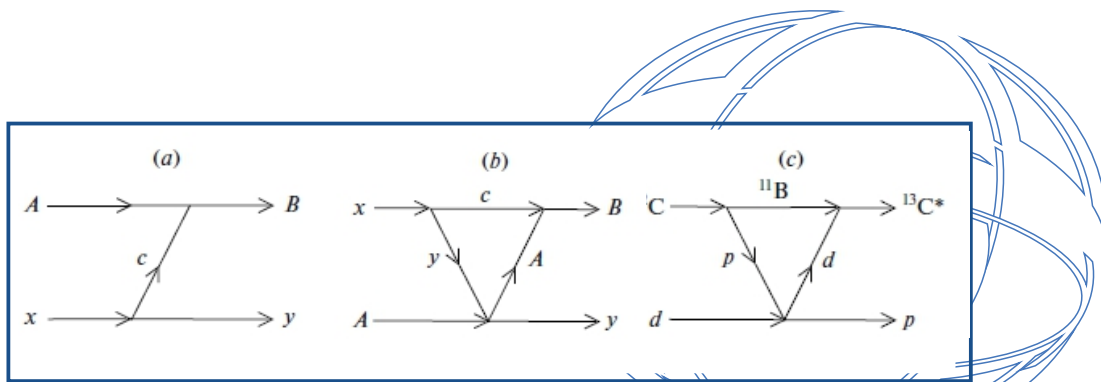
Исследована возможность использования двойной ионизации атома гелия комптоновским рассеянием в качестве инструмента прямой спектроскопии электрон-электронных корреляций. Рассчитаны импульсные распределения ядра и электронов в случае двукратной комптоновской ионизации атома гелия. Рассмотрен комптоновский распад позитрония и проведено сравнение дифференциальных сечений этого процесса с аналогичными сечениями для комптоновской ионизации атома водорода. Подробно исследована возможность использования измерения полного дифференциального сечения реакции однократной комптоновской ионизации атома без регистрации рассеянных фотонов для изучения импульсного распределения активного электрона в атомах мишени.



Однократное дифференциальное сечение двойной ионизации атома гелия vs импульса ядра. Различные кривые соответствуют парам начальной и конечной модельных волновых функций с различной степенью электронных корреляций

Определение коэффициентов асимптотической нормировки путем аналитического продолжения дифференциальных сечений

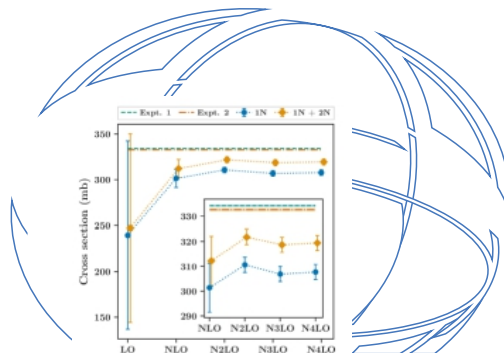
Рассмотрен метод определения асимптотических нормировочных коэффициентов (АНК) путем аналитического продолжения экспериментальных дифференциальных сечений ядерных реакций передачи с учетом кулоновского взаимодействия в начальном, конечном и промежуточном состояниях. Развитым методом определен АНК для канала $^{13}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}+n$. Путем аналитического продолжения парциальных амплитуд рассеяния альфа-частиц на ^{12}C найден АНК для вершины $^{16}\text{O}^*(0^+) \rightarrow ^{12}\text{C}+\alpha$.



Диаграммы Фейнмана для реакции $A + x \rightarrow B + y$

Расчет сечения реакции $pn \rightarrow d\gamma$ в рамках киральной эффективной теории поля

Выполнен расчет сечения радиационного захвата $pn \rightarrow d\gamma$ в области низких энергий, где доминирует канал реакции M1. С использованием нуклон-нуклонного взаимодействия LENPIC до пятого порядка (N4LO) вычислены волновые функции начального и конечного состояний и оценены фазовые сдвиги состояния рассеяния и свойства дейтрона. Оператор перехода получен в киральной теории эффективного поля (КЭТП) вплоть до следующего за ведущим порядка (N2LO). Вычислены сечения захвата, количественно оценены неопределенности результатов расчета из-за обрезания порядка. Сечения, рассчитанные с точностью до порядка N2LO, хорошо согласуются с данными экспериментов и другими теоретическими предсказаниями.



Порядок приближения NN-взаимодействия КЭТП
Сечение реакции $pn \rightarrow d\gamma$ в тепловой точке

Вычисление ширин околопороговых резонансов ядер в рамках модели оболочек без инертного кора

В рамках развитого авторами ab initio подхода, метода ортогональных функций кластерных каналов, впервые исследованы энергии и ширины реального и виртуального распадов околопороговых состояний ядра ^{10}Be в нейтронные каналы. Получено вполне удовлетворительное согласие рассчитанных значений этих величин с экспериментальными данными. Таким образом продемонстрированы хорошие перспективы применения данного подхода для описания процессов взаимодействия нейтронов с легкими атомными ядрами.

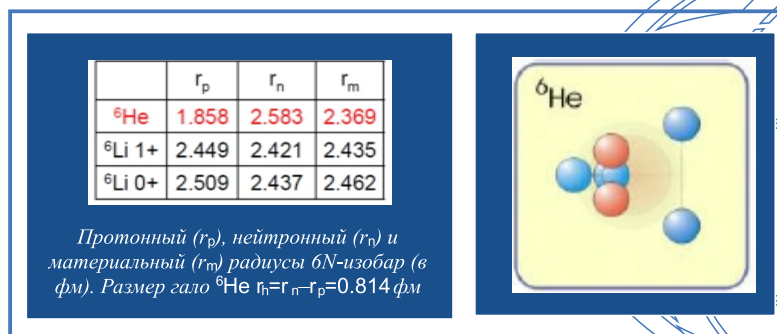
J^π	$I(Jc)$	$2g\Gamma(E_{th})$	$2g\Gamma(E_{exp})$	$2g\Gamma_{exp}$
1^-	0(1)	1.02 keV	1.00 keV	
	2(1)	$<10^{-10}$ eV	$<10^{-10}$ eV	0.510 keV
	2(2)	$<10^{-11}$ eV	$<10^{-11}$ eV	
2^+	1(1)	$<10^{-3}$ eV	$<10^{-3}$ eV	
	1(2)	$<10^{-4}$ eV	$<10^{-4}$ eV	
2^-	0(2)	1.08 keV	1.03 keV	
	2(1)	$<10^{-10}$ eV	$<10^{-10}$ eV	0.937 keV
	2(2)	$<10^{-11}$ eV	$<10^{-11}$ eV	
3^-	2(1)	42.5 keV	9.08 keV	15.7 keV
	2(2)	52.6 keV	11.29 keV	

Вычисленные парциальные Γ_{th} и измеренные полные ширины Γ_{exp} распада состояний ядра ^{10}Be

Вычисление размеров borromean- и tango-гало ядер

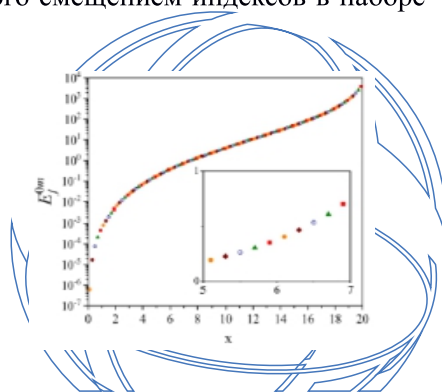
Предложена новая двумерная процедура экстраполяции значений радиусов вещества, нейтронов и протонов, полученных по оболочечной модели без кора, на бесконечные размеры ее базиса. Вместе с потенциалом JISP16, который часто используется в расчетах радиусов в этой модели, применяется потенциал

Daejeon16. Объектом изучения стало гало-ядро ${}^6\text{He}$. Проведенное исследование свидетельствует о том, что гало в ${}^6\text{He}$ имеет большие размеры: 0,7–0,8 фм. Небольшой разброс значений радиусов и разумное согласие полученных результатов с экспериментальными данными, а также результаты других расширенных расчетов *ab initio* демонстрируют высокую эффективность разработанного подхода и, следовательно, хорошие перспективы его применения.



Новый метод решения задач рассеяния на основе дискретизации спектра

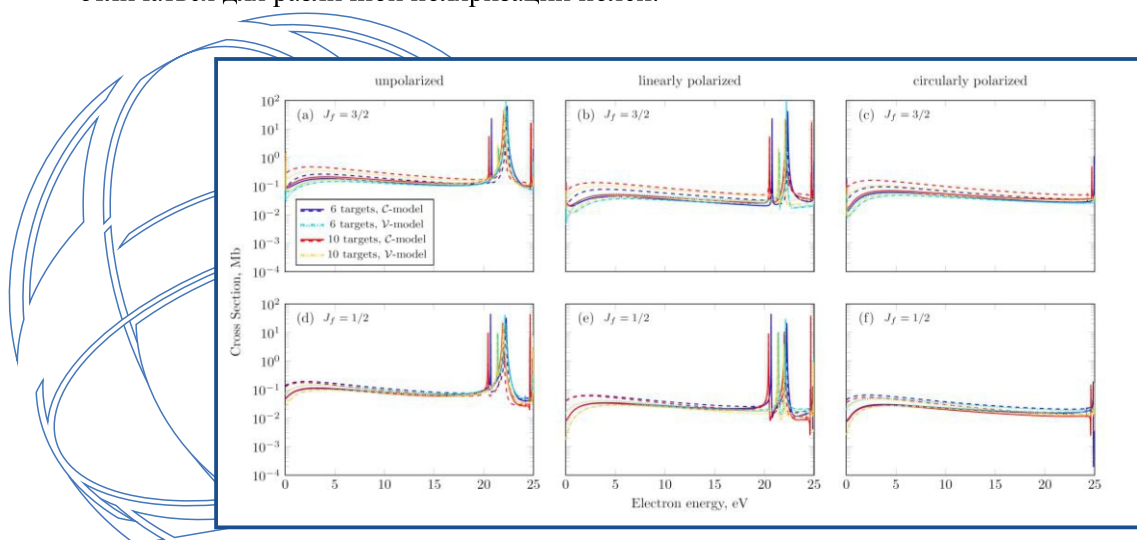
Предложена новая методика, позволяющая находить фазовые сдвиги рассеяния и параметры резонансов непосредственно из дискретизированных непрерывных спектров асимптотического и полного гамильтонианов в случае, когда эти операторы представлены матрицами в некотором конечном квадратично интегрируемом базисе. Предлагаемый подход основан на возможности аппроксимации дискретизированного спектра непрерывной спектральной функцией. Продемонстрирована инвариантность дискретизированного спектра относительно преобразований базиса, вызванного смещением индексов в наборе параметров базиса, на примере базиса Гаусса. Это свойство инвариантности позволяет комбинировать спектры, полученные с использованием разных базисов одинаковой размерности в один общий спектральный набор. Такое объединение спектров позволяет найти фазовые сдвиги рассеяния на плотной энергетической сетке, а также определять параметры резонансов с хорошей точностью при использовании наборов базисов умеренной размерности. Это свойство инвариантности можно использовать также в многоканальной задаче, где оно позволяет построить вырожденный дискретизированный многоканальный спектр асимптотического гамильтониана, а также найти сдвиги собственных фаз. Кроме того, показано, как использовать объединение дискретизированных спектров для нахождения параметров узкого резонанса в многоканальной задаче.



Объединение спектров: точки разного цвета, отвечающие разным базисам, ложатся на общую кривую

Обнаружение спектроскопических особенностей при ионизации возбужденных состояний атома неона

Спектроскопические особенности амплитуд фотоионизации, такие как куперовские минимумы или автоионизационные состояния, играют критически важную роль при анализе взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. При этом наблюдение таких особенностей в каналах той же четности, что и основное атомное состояние, долгое время было затруднено, так как эти каналы являются дипольно-запрещенными. В настоящее время благодаря росту интенсивности источников ВУФ-излучения эти наблюдения проводятся в резонансной двухфотонной ионизации. Были исследованы куперовские минимумы и низшие (дважды возбужденные и частично-дырочные) автоионизационные состояния при ионизации нижнего возбужденного состояния иона. Показано, что проявление спектроскопических особенностей может отличаться для различной поляризации полей.

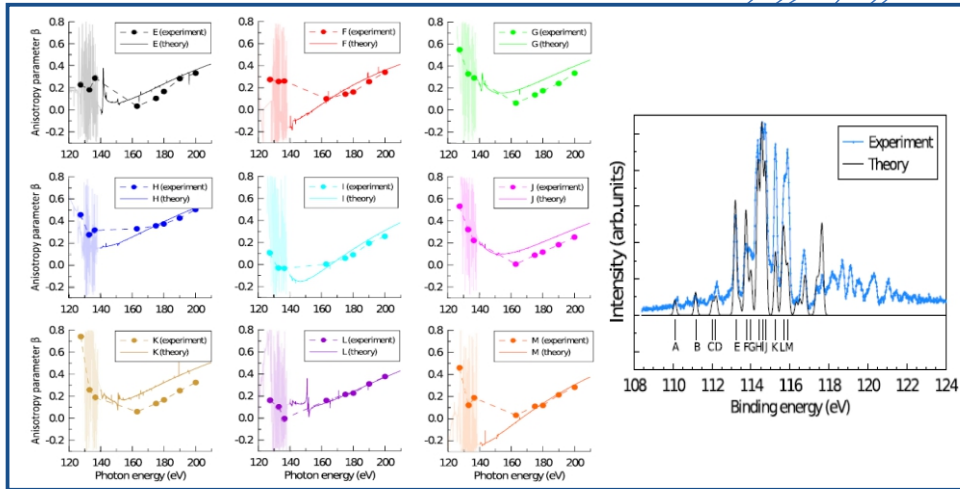


Сечение фотоионизации $2s^2 2p^5 ({}^2P_{3/2}) 3s [3/2]$ состояния в $2s^2 2p^5 ({}^2P_{3/2})$ (верхний ряд) и $2s^2 2p^5 ({}^2P_{1/2})$ (нижний ряд). Показаны сечения ионизации неполяризованным полем (a, d), полем линейной (b, e) и круговой (c, f) поляризации, рассчитанные в различных моделях и представлениях длины и скорости

Описание механизмов образования и угловые распределения корреляционных спутников в спектре криптона выше порога ионизации 3d-оболочки

Проведена теоретическая интерпретация экспериментальных спектров фотоионизации криптона, полученных на синхротроне 4-го поколения MAX IV (Лунд, Швеция). На основании обширных расчётов методом R-матрицы смоделированы амплитуды и парциальные сечения фотоионизации в различных каналах, а также параметры анизотропии угловых распределений. Это позволило произвести идентификацию спутничных линий в экспериментальных спектрах и

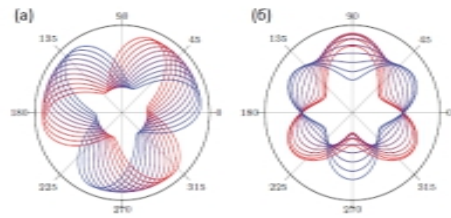
определить доминирующий механизм образования различных спутников типа $3d^{-1}4d^{-1}nl$ и $3d^{-1}4s^{-1}nl$ в терминах нормальной и сопряжённой «встряски» (shake-up). Энергетические зависимости параметров анизотропии β для спутниковых линий оказались в хорошем согласии с экспериментально извлечёнными параметрами.



Параметры анизотропии угловых распределений фотоэлектронов (слева) для спутниковых линий типа $3d^{-1}4p^{-1}nl$ в фотоэлектронном спектре (справа). Сплошными линиями обозначены результаты теоретического моделирования, точками – экспериментальные результаты

Ионизация атомов бихроматическим полем кратных $\omega + 2\omega$ частот произвольной поляризации

Изучены особенности электронной эмиссии из атомов в поле основной и второй гармоник лазера для условий, приближенных к реализованным сейчас на лазерах на свободных электронах. Получены общие выражения для угловой анизотропии и поляризации спина фотоэлектронов. Выражения применены для описания ионизации валентной оболочки атомов инертных газов и проиллюстрированы расчетами для неона. Исследована возможность управления характеристиками электронной эмиссии посредством изменения относительной фазы между гармониками, т. е. реализации одного из видов когерентного контроля. Совместное действие основной ω -и второй 2ω -

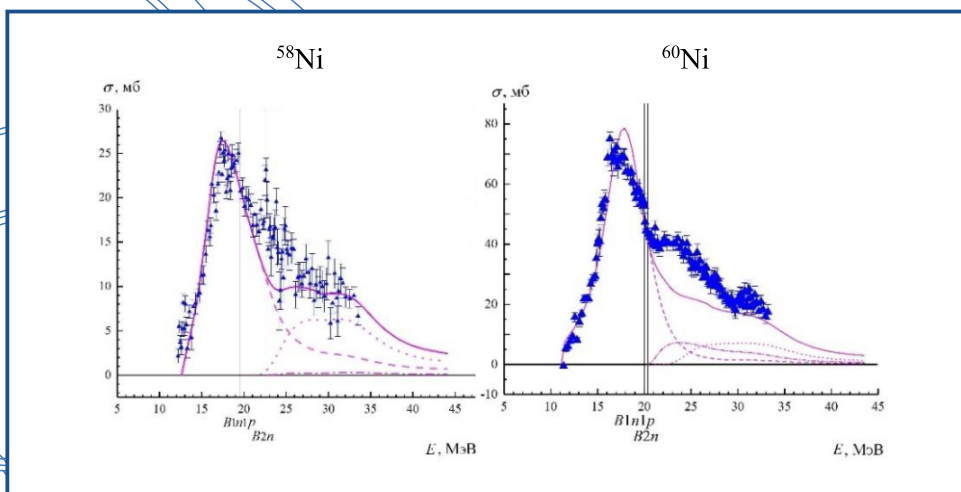


Трансформация формы углового распределения фотоэлектронов в плоскости поляризации гармоник при изменении фазы между полями ϕ от 0 до π с шагом 0.1π для (а) гармоник круговой поляризации противоположных спиральностей, поляризованных в одной плоскости, (б) линейно поляризованных в перпендикулярных направлениях гармоник

гармоники дает возможность управлять направлением вылета и поляризацией спина фотоэлектронов с энергией ($2\omega - IP$). Исследованы геометрические аспекты процесса. Интерференция двух путей допускает появление новых компонент поляризации спина.

Новые данные по фоторасщеплению ядер $^{58,60}\text{Ni}$

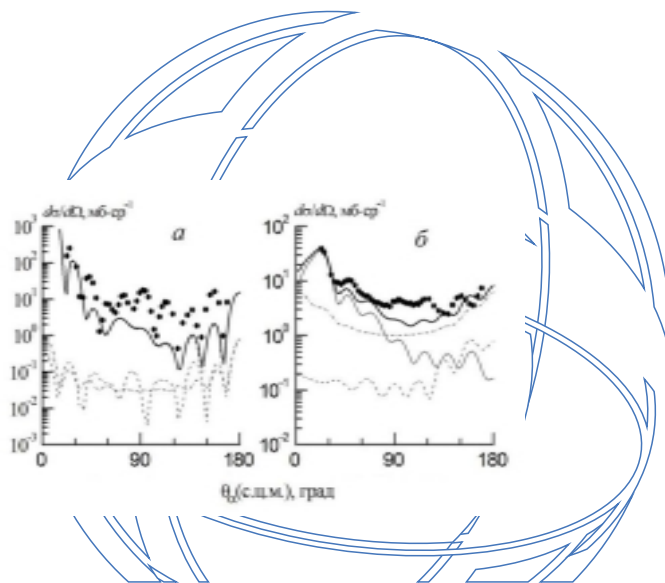
С помощью физических критериев исследована достоверность данных по сечениям парциальных реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на изотопах $^{58,60}\text{Ni}$, полученных в экспериментах с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами и тормозным γ -излучением. Установлено, что сечения во втором случае абсолютно не удовлетворяют критериям достоверности. Сечения в первом случае также не удовлетворяют критериям достоверности, но не столь существенно в случае ^{60}Ni и существенно в случае ^{58}Ni . В первую очередь это относится к реакции $^{58}\text{Ni}(\gamma, 2n)^{56}\text{Ni}$. С помощью экспериментально-теоретического метода оценки получены новые данные по сечениям реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$. Определены причины недостоверности экспериментальных данных – систематическая погрешность разделения вкладов двухнуклонных реакций $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 1n1p)$, которая в случае изотопа ^{58}Ni приводит к завышению в 20 раз величины сечения реакции $(\gamma, 2n)$, а также различия структуры верхних уровней ядер. Оцененные сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 1n1p)$ и $(\gamma, 2n)$ объясняют известное различие сечений фотонейтронных и фотопротонных реакций на исследованных ядрах, устанавливая приоритет протонных каналов распада состояний гигантского резонанса в случае изотопа ^{58}Ni .



Сравнение экспериментальных сечений выхода нейтронов $\sigma^{\text{экс}}(\gamma, xn) = \sigma^{\text{экс}}(\gamma, 1n) + \sigma^{\text{экс}}(\gamma, 1n1p) + 2\sigma^{\text{экс}}(\gamma, 2n)$ с теоретическими сечениями реакций, рассчитанными в комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФЯР) ((γ, xn) – сплошная линия, $(\gamma, 1n)$ – пунктирная линия, $(\gamma, 1n1p)$ – точечная линия), $\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 2n)$ – штрих-пунктирная линия). В случае ^{60}Ni пороги, энергетические положения и амплитуды сечений реакций $(\gamma, 1n1p)$ и $(\gamma, 2n)$ близки, а в случае ^{58}Ni – существенно различаются в пользу реакции $(\gamma, 1n1p)$

Проявление структуры волновых функций ядра $^{16}\text{O}(g.s.; 3^-)$ в реакциях $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)$

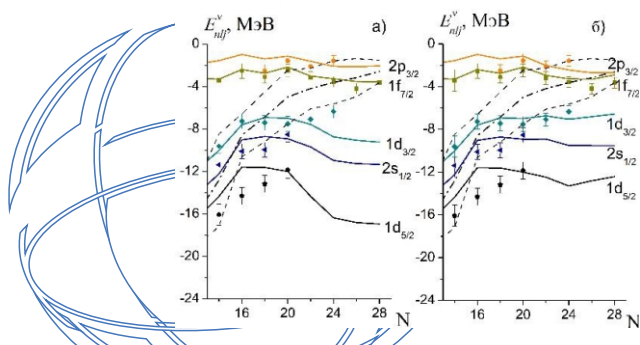
Структура волновых функций ядра $^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ исследована с использованием полученных ранее экспериментальных сечений реакций $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ и $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}(g.s., 3^-)$ при $E_\alpha = 30.3$ МэВ. Анализ проведен в рамках метода связанных каналов с учетом прямых механизмов срыва протона и передачи тяжелого кластера ^{12}C , а также в модели составного ядра. Каждый из рассмотренных механизмов обусловлен конкретной конфигурацией волновой функции ядра ^{16}O . Оболочечные конфигурации реализованы в механизме срыва протона и механизме составного ядра. Обмен тяжелым кластером ^{12}C чувствителен к наличию $\alpha + ^{12}\text{C}$ конфигурации. Интенсивный $E3$ -переход между основным и 3^- -состояниями в ядре ^{16}O связывается с принадлежностью этих состояний к одной “вращательной” полосе в 4α -тетраэдной модели ^{16}O , что обосновывает использование метода связанных каналов. Анализ вклада отдельных механизмов в дифференциальные сечения исследуемых реакций позволил заключить, что волновая функция ядра ^{16}O в основном состоянии преимущественно определяется 4α -тетраэдной и оболочечной конфигурациями. Учет $\alpha + ^{12}\text{C}$ конфигурации важен для описания реакций с возбуждением состояния 3^- ядра ^{16}O .



Сечение рассеяния $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}(g.s.; 3^-)$; $\alpha - g.s., - 3^-$ (сплошная кривая) определяется когерентным суммированием амплитуд МСК (4α -конфигурация) (тонкая кривая) и механизма передачи ^{12}C ($\alpha + ^{12}\text{C}$ -конфигурация) (штрих) и для неупругого рассеяния согласуется с экспериментом за исключением области средних углов. Вкладом механизма СЯ (штрих-пунктир) в упругом канале можно пренебречь, в неупругом канале механизм СЯ (б) существенен во всей области углов



О зависимости диффузности ядерного потенциала от нейтрон-протонной асимметрии и ее влиянии на эволюцию одночастичных спектров



Нейтронные одночастичные спектры изотопов Si. Темные значки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчет с a_{HF} , не зависящей от нейтрон-протонной асимметрии (а) и $a_{HF} = 0.75, 0.80, 0.9$ и 1.0 фм соответственно для $N = 22, 24, 26, 28$ (б). Штрихпунктирная линия – энергия Ферми, штриховые линии – энергия отделения нейтрона – S_n от ядер с N (нижняя линия) и $N+1$ (верхняя линия)

Выполнен анализ одночастичных энергий изотопов Si, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Sn по дисперсионной оптической модели. Исследовалось влияние значений параметра диффузности a_{HF} хартри-фоковской составляющей потенциала на описание экспериментальных данных об эволюции нейтронных одночастичных энергий изотопов Si, нейтронных энергетических щелей $1f_{5/2} - 2p_{3/2}$ в изотопах ядер от Ca до Ni и протонных щелей $2s_{1/2} - 1d_{3/2}$ и $1g_{7/2} - 2d_{5/2}$ в изотопах Ca и Sn соответственно. Результаты свидетельствуют о зависимости параметра a_{HF} от нейтрон-протонной асимметрии.

Оптимизация проведения радиационной обработки биообъектов

В настоящее время все более широкое применение находит радиационный метод обработки продуктов питания и сельскохозяйственного сырья с целью обеспечения микробиологической безопасности продукции и увеличения сроков ее хранения. В 2022 г. проведены исследования влияния физических характеристик ионизирующих излучений на физико-химические и биохимические процессы в биообъектах после проведения радиационной обработки, изменение органолептических свойств продукции, повышению эффективности радиационной обработки объектов органического и неорганического происхождения.

- Установлены технологические режимы радиационной обработки отдельных категорий мясных и рыбных охлажденных продуктов питания, не влияющие на их органолептические и химические свойства и увеличивающие сроки хранения продукции. Предложена математическая модель, позволяющая оценить сроки хранения продукции, прошедшей радиационную обработку, в зависимости от параметров облучения.
- Найдены летучие органические соединения, концентрация которых устойчиво возрастает с увеличением дозы облучения в первые сутки после облучения для ряда продуктов питания. Показана возможность применения флуорометрического и спектрофотометрического методов для идентификации факта облучения клубней картофеля различных сортов.
- Разработан метод выявления скрытых повреждений белковых молекул после радиационной обработки.
- Найдены технологические режимы радиационной обработки различных сортов картофеля, подавляющие развитие грибковых заболеваний на

клубнях нового урожая и не приводящие к значительному снижению урожайности культур. Найдены дозы облучения предпосадочной обработки ускоренными электронами семян зерновых и масляничных культур, стимулирующие прорастание растений и снижающие риск заражения растений заболеваниями различной этиологии из почвы.

- Разработан универсальный алгоритм, позволяющий рассчитать дозу, поглощенную продуктом любой геометрии и химического состава в ходе проведения радиационной обработки различными видами ионизирующего излучения, а также оценить равномерность распределения дозы облучения по всему объему продукта для любой схемы проведения облучения.
- Разработан метод повышения однородности обработки ускоренными электронами с использованием пластин-модификаторов, позволяющий повышать однородность облучения продуктов.
- Разработан алгоритм, позволяющий восстанавливать спектр пучка электронов, радиационно-технических установок, применяемых для обработки объектов органического и неорганического происхождения.

Работы выполнены совместно с лабораторией аналитической химии химического факультета МГУ, ФГБНУ ВИЛАР, с Сибирским федеральным научным центром агробиотехнологий Российской академии наук.

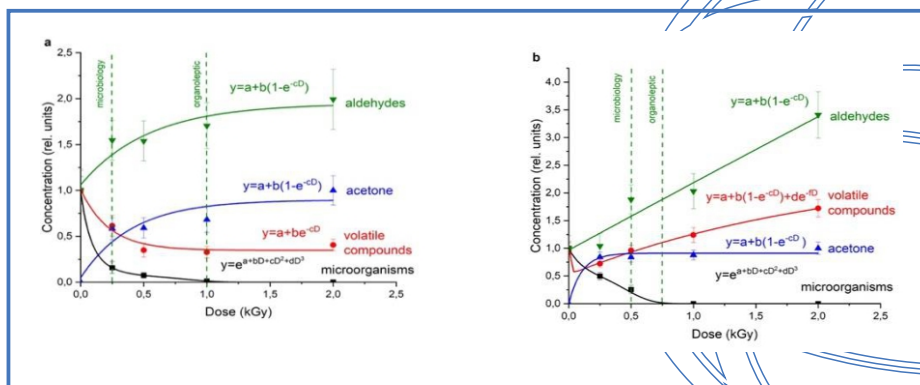
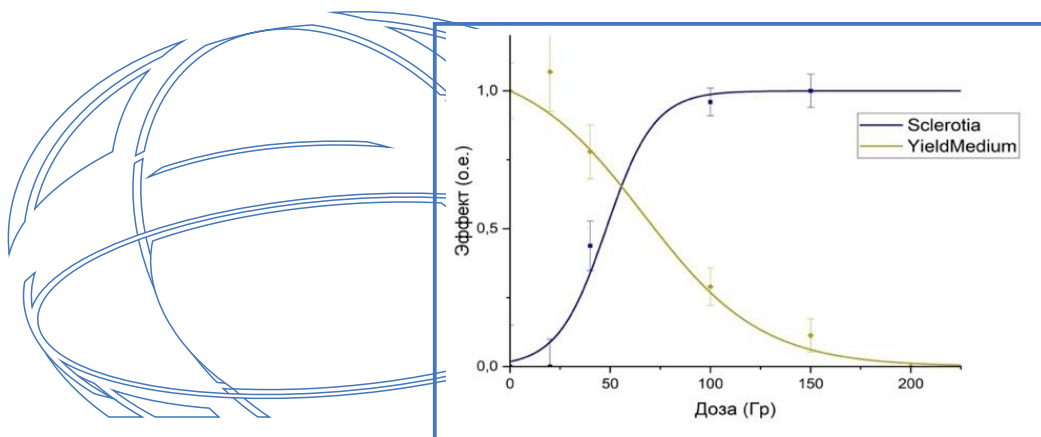


График зависимости изменения общей относительной концентрации органических летучих соединений (красная кривая), концентраций ацетона (синяя кривая) и альдегидов (зеленая кривая), а также микроорганизмов (черная кривая) в мясе индейки от дозы после обработки а) ускоренными электронами с энергией 1 МэВ и б) рентгеновским излучением



Зависимость подавления урожайности картофеля и степени заражения клубней от дозы облучения семенного картофеля

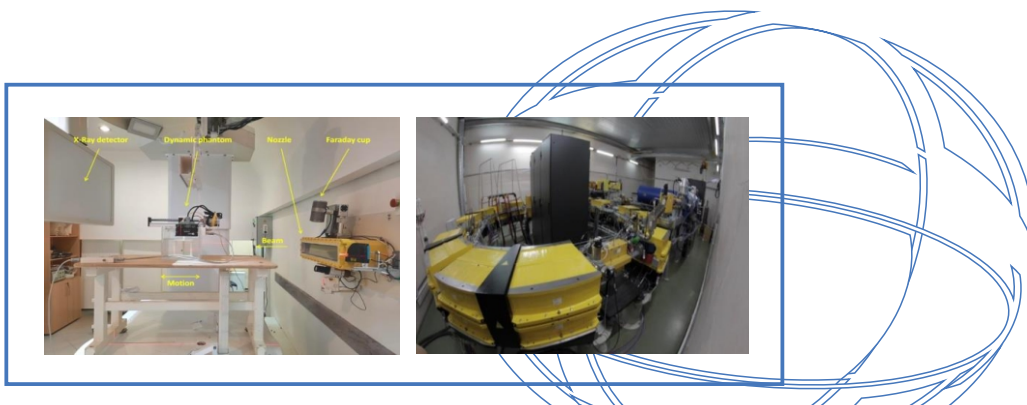
Оптимизация различных видов лучевой терапии

В лучевой терапии, помимо выбора вида ионизирующего излучения, подбора энергии с учетом вида новообразования, длительности заболевания и др., особое значение имеет точность расчета дозы облучения, а также точность облучения и снижение радиационной нагрузки на здоровые ткани. Проведенные в этой области исследования привели к следующим результатам:

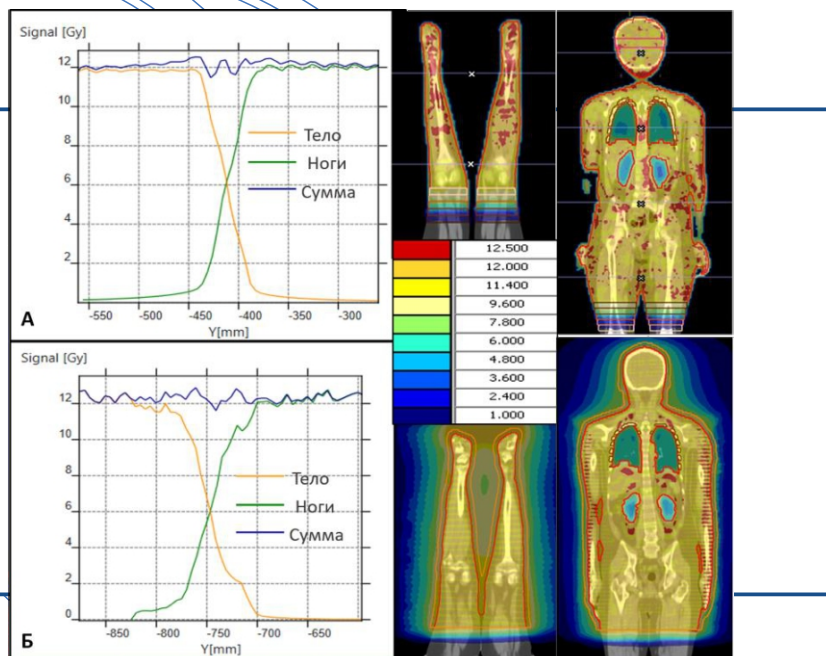
- для лучевой терапии на пучках электронов и фотонов произведена оценка дополнительной дозовой нагрузки, обусловленной вторичным излучением, возникающим в результате взаимодействия первичного излучения как с конструктивными элементами ускорителя, так и с тканями и органами пациента. Разработаны методы определения потоков и спектров вторичных нейтронов с использованием активационных мишеней из естественного тантала и сферических детектором Боннера. Это позволит скорректировать планирование облучения и добиться доставки оптимальных доз к мишеням в теле пациента;
- для протонной терапии, используемой для локализаций грудной клетки и брюшной полости, осложненных влиянием интрафракционных движений опухоли и окружающих ее здоровых тканей, вызванных дыханием и сердцебиением пациента, разработан динамический фантом, оптимизированный под работы на комплексе протонной терапии и позволяющий моделировать интрафракционное движение мишени в водной среде, что необходимо как для проведения различных дозиметрических исследований, так и для контроля качества протонной терапии. Разработана собственная система контроля дыхания пациента в реальном времени. В рамках исследования современных методов восстановления протонных изображений сформулированы оптимальные условия для планирования протонной терапии в клинической практике;
- на базе центра детской гематологии имени Дмитрия Рогачева разработан передовой метод тотального облучения тела пациента на медицинских линейных ускорителях TomoTherapy и Elekta Synergy с использованием

- технологии модуляции интенсивности. Разработаны методы транзитной дозиметрии на основе детекторов, встроенных в ускоритель TomoTherapy;
- по результатам моделирования процесса радиационной обработки костного имплантата потоком гамма-квантов и пучком ускоренных электронов выработаны рекомендации по оптимизации этого процесса для обеспечения равномерности распределения величины поглощенной дозы в костной ткани. Применение ускоренных электронов обеспечивает возможность сокращения времени эффективной радиационной стерилизации объектов биомедицинского назначения с суток до нескольких минут, что делает пучки быстрых электронов все более перспективной альтернативой гамма-квантам.

Работы выполнены совместно с АО ПРОТОМ, Физическим институтом Академии наук имени П.Н. Лебедева (подразделение ФТЦ ФИАН), физическим факультетом МГУ и Всероссийским научно-исследовательским институтом лекарственных и ароматических растений.



Внешний вид эксперимента по облучению подвижной мишени динамического фантома (слева) и внешний вид протонного синхротрона (справа), на котором производится облучение



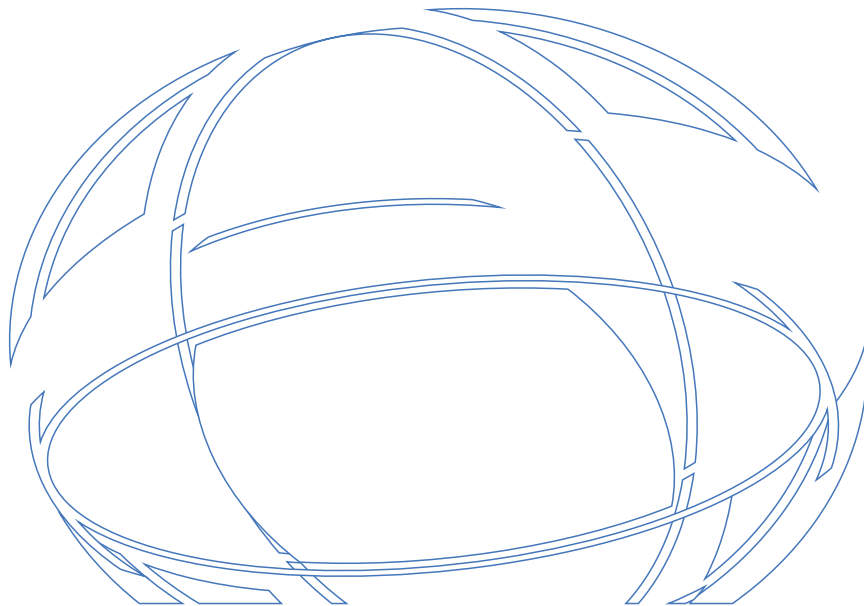
Профиль поглощенной дозы в области наложения радиационных полей и распределение дозы в коронарной плоскости пациента для а) Tomo Therapy и б) Elekta Synergy

Исследование получения радионуклидов для ядерной медицины

- Исследованы реакции (γ , pXn) для ядер молибдена. Получены экспериментальные средневзвешенные выходы реакций для тормозных γ -спектров с граничными энергиями 20, 40 и 55 МэВ. Обнаружено, что доминирование полупрямых механизмов происходит в области недалеко от энергетического порога реакций, что существенно увеличивает средневзвешенные выходы по сравнению со значениями, полученными по статистическим законам. В данном случае изотоп ^{92}Mo является исключением.
- Впервые изучены реакции (γ , αXn) на изотопах молибдена. Получены экспериментальные средневзвешенные выходы реакций (γ , αXn) на изотопах циркония, ниобия и молибдена для тормозных γ -спектров с граничными энергиями 20, 40 и 55 МэВ, значительно превышающие теоретические значения. Обнаружено, что такие реакции происходят при энергиях ниже кулоновского барьера. Другой интересный результат заключается во влиянии оболочечной структуры ядра на выход данного типа реакций. Реакции (γ , αn) на изотопах ^{93}Nb и ^{94}Mo происходят уже при энергии тормозных фотонов 20 МэВ. После испускания α -частицы их остаточные ядра имеют магическое число нейтронов $N = 50$. Средневзвешенный выход реакций (γ , αXn) на этих изотопах составляет примерно 1 мбн, в 10–100 раз превышая выходы на других изотопах.

- Исследована возможность производства изотопа ^{89}Zr , оптимального для диагностических исследований, где переносчиками выступают клетки иммунитета (моноклональные антитела), на ускорителях электронов, что облегчит и удешевит процесс по сравнению с принятым на сегодня производством на ускорителях тяжёлых заряженных частиц. Исследовано образование ^{89}Zr в фотоядерных реакциях на изотопах молибдена на ускорителях электронов 20 и 55 МэВ. Полученные результаты позволяют получить высокую изотопную чистоту ^{89}Zr и требуют дальнейшей разработки.

Работы выполнены совместно с физическим факультетом МГУ.



СОБЫТИЯ 2022 г.

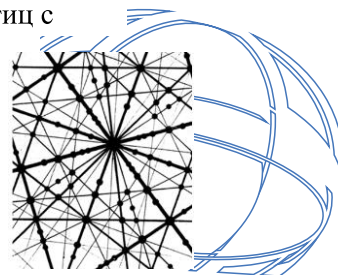
51-я Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 24 – 26 мая 2022 г.



Традиционно в мае в НИИЯФ МГУ прошла ежегодная 51-я Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами.

Основные направления конференции:

- Актуальные проблемы физики взаимодействия ускоренных частиц с веществом.
- Взаимодействие ионов с поверхностью и наноструктурами (рассеяние, распыление, наноструктурирование и эмиссия вторичных частиц) .
- Ориентационные и релятивистские эффекты, потери энергии, изменение зарядового состояния частиц .
- Модификация и анализ приповерхностных слоев ионными и электронными пучками .
- Радиационные эффекты в наноструктурах (нано- и био- объекты). Ядерно - физические методы исследования, синхротронные и нейтронные методы.



LXXII Международная конференция "Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения", 11–16 июля 2022 г.

11 июля в Шуваловском корпусе МГУ состоялось торжественное открытие LXXII Международной конференции "Ядро–2022: Фундаментальные вопросы и приложения". Работа конференции была организована по секциям, заседания которых прошли в аудиториях физического факультета и НИИЯФ МГУ.



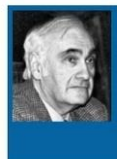


Основные направления конференции:

- Структура атомного ядра: теория и эксперимент.
- Экспериментальные и теоретические исследования ядерных реакций.
- Промежуточные и высокие энергии, столкновения тяжелых ионов.
- Физика нейтрино и ядерная астрофизика.
- Разработка и создание ускорителей заряженных частиц и источников ионизирующего излучения.
- Применение ядерно-физических методов в науке и технологиях.
- Источники синхротронного и нейтронного излучения и их применение в научных и прикладных задачах.
- Ядерно-физические методы и технологии в медицине, радиационная экология.

XXIII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", 23–24 ноября 2022 г.

В ноябре 2022 г. состоялась XXIII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", организованная НИИЯФ МГУ совместно с физфаком МГУ. В 2022 г. конференция была посвящена 130-летию академика Д.В. Скобельцына. Конференция прошла в онлайн-формате.



Конференция "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"

Семинар-совещание «Комптоновские источники рентгеновского излучения, перспективы развития и применения», 7–8 июня 2022 г.

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта совместно с НИИЯФ МГУ провел 7–8 июня рабочий семинар-совещание «Комптоновские источники рентгеновского излучения,

перспективы развития и применения» в онлайн формате. В рамках семинар-совещания были представлены проекты комптоновских источников рентгеновского излучения и рассмотрены их применения, обсуждены возможные подходы по разработке рентгеновской оптики и монохроматизации излучения для высоких энергий (гамма-квантов).



Диссертации

физико-математические науки, диссертационный совет МГУ.013.2(01.11)

Докторские:

Липатов Артём Владимирович; диссертация на тему «Жесткие процессы КХД за рамками коллинеарного приближения»; специальность 01.04.23 - Физика высоких энергий. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 25 марта 2022 г.

Диссертация посвящена развитию нового направления современной физики высоких энергий — исследованию различных жестких процессов квантовой хромодинамики (КХД) за рамками стандартного (коллинеарного) приближения с учетом ненулевого поперечного импульса начальных взаимодействующих глюонов и кварков. Изучаются процессы одиночного и парного рождения тяжелых (s , b или t) кварков, связанных состояний s - и b -кварков – S - и P -волновых чармониев, боттомониев и $B(c)$ мезонов, исследуются их поляризационные свойства. Рассматриваются процессы инклюзивного и ассоциативного (в сопровождении одной или нескольких адронных струй) рождения прямых фотонов, калибровочных бозонов и бозонов Хиггса (наблюдаемого в различных модах распада) при высоких энергиях. Предложены новые функции распределения глюонов и кварков в протоне, зависящие от их поперечного импульса — неинтегрированные, или Transverse Momentum Dependent (TMD) партонные распределения. Разработан Монте-Карло генератор событий PEGASUS, позволяющий в автоматическом режиме производить вычисления сечений широкого ряда процессов КХД с учетом TMD динамики распределений глюонов в протоне.

Дудко Лев Владимирович; диссертация на тему «Физические основы и методы оптимизации исследований одиночного рождения топ-кварка на адронных коллайдерах»; специальность 01.04.23 - Физика высоких энергий. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 25 ноября 2022 г.

Диссертация посвящена исследованиям процессов рождения топ-кварка в электрослабых взаимодействиях. Объектом исследований является наиболее тяжелая точечная частица, топ-кварк. Целью исследований являются теоретические вычисления и экспериментальный поиск процессов электрослабого рождения топ-кварка, измерение характеристик этих процессов и поиск возможных отклонений от предсказаний Стандартной модели. В диссертационной работе выполнены феноменологические исследования топ-кварка, проведено моделирование таких процессов. Феноменологические результаты и моделирование применены в экспериментах D0 коллайдера Теватрон и CMS коллайдера ЛHC. Экспериментальные исследования привели к открытию процессов электрослабого рождения топ-кварка, измерению сечений и параметра V_{tb} . Проведен поиск возможных отклонений от предсказаний Стандартной модели в заряженных токах во взаимодействии топ-кварка с W-бозоном и b-кварком, и поиск нейтральных токов во взаимодействии топ-кварка с u- или c-кварком и глюоном. Отклонения не обнаружены и были установлены верхние ограничения на аномальные параметры.

Кандидатские:

Студеникин Феликс Рикардович; диссертация на тему «Модификация пучка ускоренных электронов для повышения равномерности радиационной обработки облучаемых объектов»; специальность 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 20 мая 2022 г.

Голубенко Анна Александровна; диссертация на тему «Поляризованная структурная функция электророждения нейтрального пиона на протоне в резонансной области»; специальность 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 17 июня 2022 г.

Белов Илья Николаевич; диссертация на тему «Рождение дважды тяжелых адронов за пределами ведущего порядка по константе сильной связи и внутренней скорости кварка»; специальность 01.04.23 - Физика высоких энергий. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 16 сентября 2022 г.

Харламов Петр Ильич; диссертация на тему «Методика тестирования прототипа модуля трековой системы эксперимента VM@N»; специальность 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц. Работа была выполнена в МГУ имени М.В. Ломоносова. Защита состоялась 25 ноября 2022 г.

Для заметок

